



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME : Etude au moyen des essais non destructifs pour la caractérisation physique et mécanique d'un béton.

Préparé par : BADACHE Nadjib
BELGUENDOUBE Antar

Soutenu le : 25/06/2013

Devant le jury :

Encadreur : LOGZIT.N
Co-Encadreur : BELAGRAA.L

Président : SEDDIKIA
Examineur: BENAICHI.EL
Examineur: LOUMACHI.L

2013

Remerciement

Tout d'abord, nous tiens à remercions "ALLAH" le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce présent travail ainsi que nos parents qui nous toujours encouragés et soutenu durant toute la durée de nos études.

Nous adressons nos profonds remerciements à nos encadreur de mémoire Mr LOGZIT.N, chef de département Génie Civil, pour avoir accepté nous encadrer, pour ses conseils et ses orientations pour mieux élaborer ce travail de recherche et pour qu'il nous guider sur le bon chemin durant l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons exprimer notre sincère gratitude à Monsieur BELAGRAA.L qu'il accepté de participer comme co-encadreur dans ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, afin de mener au mieux ce travail de recherche.

Nous voudrions remercions l'ensemble de notre jury de Mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail :

Mr.MEDDAH.A, Mr.BENAICHI.EL, Mr.LOUMACHIL et Mr.MEKKI.L.

Tous les enseignements de : Génie Civil, surtout Mr. RMADHNA.M

Nous adressons nos remerciements à tous les responsables du laboratoire de Génie Civil : ZOBIR, RACHID, FARID, FATIHA et HAYAT qui ont toujours été disponibles pour nous donner un petit coup de main et beaucoup d'encouragement.

Nous remercîments aussi l'administration de génie civil.

Nous remercîments aussi Mr. BENCHNAFE.M pour son médiocrité et son aide afin que nous accomplissions cette étude.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents que j'aime beaucoup, et auxquelles je tiens à leurs montré toute ma fierté et saluer leur encouragement tout au long de mes études.

- ✚ A mon frère : Nassim.
- ✚ A ma sœur : Assia.
- ✚ A mes tentes et oncles en particulier tout.
- ✚ A mes grand-mère Louiza et Rebiha à laquelle je souhaite une longue vie.
- ✚ A mes bien aimée Nabil, Abd Ennour.
- ✚ A tous mes amis (Zohir, Ismahane, Ilham, Nassima, Siham, Fouzia et autre).
- ✚ A tous mes amis de promos master 2 génie civil.
- ✚ A mon binôme Antar et toute sa famille.
- ✚ A tout ma famille et surtout la famille BEN SAAD ALLAH
- ✚ A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

NADJIB.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ✚ A mes parents.
- ✚ A mes frères et sœurs.
- ✚ A mes chers amis : Nabil, Abed Ennour, Nadjib, Younes, Mohamed, Mahdi, Houcin.
- ✚ A tout les familles BENZAOUI, BEN DRIMIA, BEN HAMIMI et BOU BATRA.
- ✚ A tous mes amis de promos master 2 génie civil et surtout : Ismahane, Ilham, Nassima, Siham, Fouzia et Fatah.
- ✚ A toutes les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

ANTAR.

Résumé

Résumé

Les propriétés physiques et mécaniques d'un béton dépendent essentiellement de la qualité des matériaux utilisés, des technologies et conditions de mise en œuvre. L'évaluation de la qualité du béton est fondamentale en égard au nombre et à la diversité des ouvrages constitué par ce matériau.

Bien qu'il ne soit pas possible d'effectuer une mesure directe des propriétés de résistance et autres du béton d'un ouvrage par les essais destructifs, plusieurs méthodes non destructives ont été mises au point afin de pouvoir évaluer et caractérisé les propriétés du béton en place, parmi ses méthodes l'essai d'ultrason et l'essai sclérométrique.

Ce présent travail expose une méthode expérimentale d'évaluation des propriétés physiques et mécaniques d'un béton à base des matériaux locaux de la région Bordj Bou Arreridj. Les facteurs pris en compte sont :

- La classe de résistance du béton.
- Le type de la granularité.

La finalité de notre travail est d'établir des corrélations mathématiques basent sur une étude statistique reliant les grandeurs mesurées à celles estimées avec les moindres informations sur le béton testé.

Mots clés : Béton, propriétés physiques et mécaniques, essais non destructifs, corrélations.

ملخص

الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة تخضع بالأخص الى نوعية المواد المستعملة, تقنيات و ظروف الانجاز, تعتبر عملية تقييم نوعية الخرسانة إجراء اساسيا نظرا لعدد وتنوع المنشآت المنجزة بهذه المادة.

بما انه من غير الممكن اجراء قياسات مباشرة لخصائص المقاومة و خصائص اخرى لخرسانة منشأة ما باستعمال التجارب التحطيمية, وجدت العديد من الطرق اللاتحطيمية بغرض تقدير و تحديد خصائص الخرسانة في عين المكان, من بين هذه الطرق طريقة الأمواج فوق الصوتية و طريقة المطرقة المرتدة

هذا العمل يعرض طريقة تجريبية لتقييم الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية لخرسانة مصنوعة من مواد محلية لناحية برج بوعريريج. العوامل المأخوذة بعين الاعتبار هي:

← رتبة مقاومة الخرسانة.

← النوعية الحبيبية.

الغاية من عملنا هي ايجاد علاقات رياضية تركز على دراسة إحصائية تربط المقادير المقاسة مع المقدرة مع وياقل كم من المعلومات حول الخرسانة المختبرة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة, الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية, التجارب اللاتحطيمية, العلاقات.

Abstract

The physical and mechanical properties of a concrete are depending primarily on the quality of materials used, technologies and placement conditions. The evaluation of the quality of the concrete is fundamental in regard with the number and diversity of construction projects that are made up of this material. In regards to the difficulty in the determination of the mechanical résistance of the concrete in situ using direct test. Various direct methods are proposed like the non-destructive tests (NDT) to assess the strength of concrete such as the rebound hammer and ultrasonic velocity methods used for concrete characterization.

The present research work presents an experimental program tests for physical and mechanical properties evaluation of different concrete grades based on local materials from the region of Bordj Bou Arréridj. The study here in takes into account two parameters:

- The grade of concrete.
- The granularity type of the mix.

The aim of the due study is to establish a mathematical formulation model for correlative relation based on statistical study using indirect methods tests methods (ultrasonic and rebound hammer). Data information collected among the different measured parameters and properties is considered for the proposed model.

Keywords: concrete, physical and mechanical properties, non-destructive tests, correlations.

Sommaire

Chapitre I :

I. INTRODUCTION GENERAL.....	01
I.1 problématique.....	01
I.2 Objectif.....	01
I.3 Structure du mémoire.....	02

Chapitre II: Béton et constituants

II.1 Introduction général.....	04
II.2 Qu'est-ce que le béton.....	04
II.3 Historique.....	04
II.4. Constituants du béton.....	05
II.4.1. Le ciment.....	05
II.4.1.1 Généralité sur les ciments courants.....	05
II.4.1.2. Types de ciment.....	08
II.4.1.3 Classification des ciments.....	09
II.4.1.4 Marquage des sacs du ciment.....	11
II.4.1.5 Le choix de type de ciment.....	11
II.4.2 Les granulats.....	12
II.4.2.1 Les types des granulats.....	13
II.4.2.2 Classes granulaires.....	14
II.4.2.3 Les gros granulats (graviers).....	14
II.4.2.4 Les granulats fins (Sable).....	14
II.4.3 L'eau de gâchage.....	15
II.4.3.1 Classification des types d'eau.....	16
II.4.4 Les adjuvants.....	16
II.5 Formulation du béton.....	17
II.6 Classification des bétons.....	18
II.7 Caractéristiques du béton.....	20
II.7.1 A l'état frais.....	20
II.7.2 A l'état durci.....	21
II.8 L'interface pâte –granulats.....	24
II.9 Paramètres influents sur la résistance mécaniques.....	25
II.10 Conclusion.....	26

Chapitre III : Essais non destructifs

III.1 Introduction.....	28
III.2 Définition de méthodes non destructives.....	28
III.3 Principales méthodes.....	29
III.4 Avantages et inconvénients des essais non destructifs.....	30
III.5 Essai d'auscultation sonore.....	31
III.5.1 Principe de l'essai.....	31
III.5.2 Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons.....	32
III.5.2.1 Mesures en transparence directe.....	32
III.5.2.2 Mesures en surface.....	32
III.5.2.3 Mesures en transparence par rayonnement.....	33
III.5.3 Mode opératoire en transparence directe.....	33
III.5.3.1 Préparation de l'élément.....	33
III.5.3.2 Longueur minimal de parcours.....	33
III.5.3.3 Points de mesures.....	33
III.5.3.4 Influence des armatures.....	34
III.5.3.5 Influence des conditions d'essai.....	34
III.5.4 Interprétation des résultats mesurés.....	35
III.5.5 Les avantages.....	36
III.5.6 Les inconvénients.....	37
III.6 Essai sclérométrique.....	37
III.6.1 Principe de l'essai.....	37
III.6.2 Appareillage.....	39
III.6.3 Exécution des mesures.....	39
III.6.3.1 Mesures sur éprouvettes.....	40
III.6.3.2 Mesures sur ouvrage.....	40
III.6.4 Exploitation des résultats.....	40
III.6.5 Les avantages.....	41
III.6.6 Les inconvénients.....	41
III.7 La méthode combinée.....	42
III.7.1 Les avantages.....	44
III.7.2 Les inconvénients.....	44
III.8 Quelques recherches et corrélations existantes.....	45
III.9 Caractérisation des propriétés du béton par les essais non destructifs.....	46

Sommaire

III.9.1 Estimation de la porosité, la perméabilité et la densité.....	46
Chapitre IV : Matériaux matériels et essais	
IV. 1. Introduction.....	49
IV. 2. Matériaux utilisés.....	49
IV. 3. Caractéristiques des matériaux.....	49
IV. 3. 1. Caractéristiques du gravier.....	49
IV. 3. 1. 1. Analyse granulométrique du gravier concassé.....	49
VI. 3. 1. 2. Masse volumique.....	54
VI. 3. 1. 2. 1. La masse volumique apparente (γ).....	54
VI. 3. 1. 2. 2. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ).....	55
VI. 3. 1. 3. La porosité.....	56
VI. 3. 1. 4. La compacité.....	56
VI. 3. 1. 5. L'indice des vides.....	57
VI. 3. 1. 6. La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles)	57
VI. 3. 1. 7. Degré d'absorption d'eau.....	59
VI. 3. 2. Caractéristique du sable.....	60
VI. 3. 2. 1. Analyse granulométrique.....	61
VI. 3. 2. 2. Module de finesse.....	62
VI. 3. 2. 3. Propreté « équivalent de sable ».....	63
VI. 3. 2.4. Caractéristiques physiques du sable.....	65
VI. 3. 2. 4. 1. Masse volumique apparent.....	65
VI. 3. 3. Caractéristiques du ciment utilisé.....	68
VI. 3. 3. 1. Présentation du ciment MATINE.....	68
VI. 3. 3. 2. Domaines d'utilisation.....	68
VI. 3. 3. 3. Analyses et caractérisation.....	69
VI. 3. 4. L'eau de gâchage.....	70
IV. 4 Composition du béton.....	71
IV.4.1 Méthode de SCRAMTAIEV.....	71
IV.4.2 Présentation de la méthode.....	72
IV.4.3 Calcul de la composition du béton.....	74
IV.4.4 Volume du gâchée pour 1m^3 pour les bétons à granularité discontinue.....	76
IV.4.5 Volume du gâché pour 12 éprouvettes cylindriques (10x20) cm^3	76
IV.4.6 Volume du gâché pour 1m^3 pour les bétons à granularité continue.....	77

Sommaire

IV.5 Matériels et essais.....	79
IV.5.1 Les essais sur le béton à l'état frais.....	79
IV.5.2 Les essais sur le béton a l'état durci.....	81
IV.5.2.1 Essais non destructive.....	83
IV.6. Mesure du taux d'absorption d'eau.....	85
IV.7 Méthodologie adaptée pour la manipulation.....	87

Chapitre V : Résultats et discussion.

V.1. Introduction.....	88
V.2. Etude statistique.....	88
a. Pour un béton à granularité discontinue	89
b. Pour un béton à granularité continue	90
V.3. Résultats expérimentaux obtenus à l'état frais.....	91
a. Propriétés physiques.....	91
V.3.1 La granularité discontinue.....	91
a. Teneur en air.....	91
b. Rapport E/C.....	92
V.3.2 La granularité continue.....	93
a. Teneur en air (%).....	93
b. Rapport E/C.....	94
V.4 Comparaison entre les différents types du béton.....	94
a. Teneur en air.....	94
b. Rapport E/C.....	95
V.5 A l'état durci.....	96
a. Corrélation linéaire et droite de régression.....	96
b. Le coefficient de corrélation.....	96
c. La droite de régression.....	96
V.5.1 Propriétés physiques	98
a. Absorption d'eau.....	98
V.5.1.1 Comparaison entre les différents types du béton	100
V.6 Corrélations pour les propriétés mécaniques.....	101
V.6.1 Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son	101
V.6.2 Corrélation entre l'indice sclérométrique et la résistance à la compression.....	102
V.6.3 Corrélation entre (Is/V) et la résistance à la compression	103

Sommaire

V.6.4	Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la vitesse d'ultrason.....	104
V.6.5	Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et l'indice sclérométrique..	105
V.6.6	Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.....	105
V.7	Corrélations pour les propriétés physiques.....	106
V.7.1	Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et la vitesse du son.....	106
V.7.2	Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et l'indice sclérométrique.....	107
V.8	Comparaisons entre les différentes approches.....	108
a.	Résistance à la compression (R_c) en fonction de la vitesse d'ultrason suivant quelques approches.....	108
b.	Résistance à la compression (R_c) en fonction de l'indice sclérométrique suivant quelques approches.....	109
c.	Résistance à la compression (R_c) en fonction de la combinaison entre l'indice sclérométrique et la vitesse d'ultrason suivant quelques approches.....	110
V.9.	Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un béton.....	110
V.10	Conclusion.....	112

Chapitre VI : Conclusion et perspectives.

VI.1	Conclusion générale et perspectives.....	113
------	--	-----

Liste des tableaux

Chapitre II : Béton et constituants.

Tableau II.1 : Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant.....	04
Tableau II.2: Composition minéralogique du clinker.....	06
Tableau II.3 : Les cinq types de ciment courants et leur composition.....	09
Tableau II.4 : Classes de résistance selon la norme NF- P15 -101-1.....	10
Tableau II.5: Les différentes classes granulaires.....	14
Tableau II.6 : Classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds.....	19
Tableau II.7 : Classes de résistance à la compression pour les bétons légers.....	20
Tableau II.8 : Affaissement cône d'Abrams.....	21
Tableau II.9 : Valeurs moyennes de porosité totale.....	22

Chapitre III: Essais non destructifs.

Tableau III.1: Appréciation de la compacité du béton.....	35
Tableau III.2 : Estimation de la contrainte de compression par quelques équations de corrélation.....	45

Chapitre IV : Matériaux matériels et essais.

Tableau IV.1 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).....	50
Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15).....	51
Tableau IV.3: L'analyse granulométrique de gravier concassé (15/25).....	52
Tableau IV.4 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé [(3/8), (8/15) et (15/25)].....	55
Tableau IV.5 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé [(3/8), (8/15) et (15/25)].....	56
Tableau IV.6 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.....	57
Tableau IV.7 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie.....	58
Tableau IV.8 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A	59
Tableau IV.9 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier [(3/8), (8/15) et (15/25)].....	59
Tableau IV.9 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) et (15/25).....	60

Tableau IV .10 : Analyse granulométrique du sable de dune BOUSAADA.....	61
Tableau IV.11: Classification des sables en fonction du module de finesse.....	62
Tableau IV .12 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SV} et E_{SP} ...	64
Tableau IV.13 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.....	64
Tableau IV.14: Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).....	67
Tableau IV.15 : Analyse chimiques du ciment MATINE.....	69
Tableau IV.16 : Composition minéralogique du clinker.....	69
Tableau IV.17 : Propriétés physiques du ciment utilisé.....	69
Tableau IV.18 : Temps de prise à 20°C.....	70
Tableau IV.19 : Résistance mécanique à la compression.....	70
Tableau IV.20 : Analyse chimique de l'eau utilisé pour le gâchage.....	70
Tableau IV.21 : Valeurs des coefficients A et A'.....	72
Tableau IV.22 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.....	73
Tableau IV.23 : Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment.....	74
Tableau IV.24 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité discontinue pour $1m^3$	76
Tableau IV.25 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité discontinue pour 12 éprouvettes (10*20) cm^3	77
Tableau IV.26 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité continue pour $1m^3$	78
Tableau IV.27 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité continue pour 12 éprouvettes (10*20) cm^3	78

Chapitre V : Résultats et discussion.

Tableau V.1 : Valeur du coefficient de variation.....	89
Tableau V.2: Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité discontinue à 14 jours.....	89
Tableau V.3: Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité discontinue à 28 jours.....	89
Tableau V.4 : Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité continue à 14 jours.....	90
Tableau V.5 : Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité continue à 28 jours.....	90
Tableau V.6 : Propriétés physiques des bétons étudiés.....	91

Tableau V.7: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 7 jours.....	97
Tableau V.8: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 14jours.....	97
Tableau V.9: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 28 jours.....	97
Tableau V.10 : Variation du taux d'absorption pour les différentes classes du béton à base de granularités discontinue.....	98
Tableau V.11 : Variation du taux d'absorption pour les différentes classes du béton à granularité continue.....	99
Tableau V.12 : Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un béton.....	111

Liste des figures

Chapitre II : Béton et constituants.

Figure II.1 : schématisation des différentes tâches de la fabrication des ciments courants.....	8
Figure II.2 : Ciment résistant aux sulfates MOKAWIM de HAMAM DHALAA M'sila.....	11
Figure II.3 : Ciment portland composé MATIN de HAMAM DHALAA M'sila.....	11
Figure II.4 : Ciment portland composé d'AIN LEKBIRA Sétif.....	11
Figure II.5 : Compacité d'un béton en fonction de la granulométrie du squelette granulaire.....	13
Figure II.6 : Différents types des pores.....	22
Figure II.7 : facteurs influençant la résistance du béton.....	26

Chapitre III: Essais non destructifs.

Figure III.1 : Mesures en transparence directe.....	32
Figure III.2 : Mesures en surface.....	32
Figure III.3 : Mesures en transparence par rayonnement.....	33
Figure III.4 : Points de mesures pour une dalle et un poteau.....	34
Figure III.5 : Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel.....	36
Figure III.6 : Scléromètre digital.....	37
Figure III.7 : La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire).....	38
Figure III.8 : Vu en coupe d'un scléromètre et ses composantes.....	39
Figure III.9 : Mesure sur éprouvette cylindrique (16*32) cm ³	40
Figure III.10 : La relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides.....	42
Figure (III.11): Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques et l'indice sclérométrique selon U.Bellander (1977).....	44
Figure III.12: Variation vitesse d'ultrason en fonction de la porosité.....	46
Figure III.13 : Corrélation entre la densité et la vitesse d'ultrason.....	47
Figure III.14 : La relation entre vitesse de propagation d'ultrason et les modules d'élasticité statique (Es) et dynamique (Ed).....	48

Chapitre IV : Matériaux matériels et essais.

Figure IV.1: Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/15), (15/25) ainsi leur mélange.....	53
Figure IV .2 : Appareille de Los Angeles.....	58
Figure IV .3 : L'échantillon et les boules avant l'essai.....	58
Figure IV.4 : Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA).....	61
Figure IV.5: Pourcentage de différentes fractions granulaires (3/8), (8/15) et (15/25) par la méthode de Dreux-Gorisse.....	77
Figure IV.6 : Mesure de l'affaissement.....	79
Figure IV.7 : Aéromètre à béton 8 litres.....	80
Figure IV.8 : Presse hydraulique capacité 3000 KN.....	82
Figure IV .9 : Essai d'ultrasons et ses équipements.....	83
Figure III.10 : Marquage des points des mesures sur éprouvette.....	84
Figure IV.11: Scléromètre digital.....	84
Figure IV.12 : Exécution de l'essai sclérométrique.....	85
Figure IV.13 : Préparation des éprouvettes.....	85

Chapitre V : Résultats et discussion.

Figure V.1: Variation de la teneur en air pour les différents types du béton (Granularité discontinue).....	91
Figure V.2 : Variation du rapport E/C pour les différents types du béton (Granularité discontinue).....	92
Figure V.3 : Variation de la teneur en air pour les différents types du béton (Granularité continue).....	93
Figure V.4 : Variation des rapports E/C en fonction de la variation des résistance des bétons (granularité continue).....	94
Figure V.5 : Comparaison entre la teneur en air des bétons à granularité continue et discontinue.....	94
Figure V.6 : Comparaison entre le rapport E/C pour les bétons à granularité continue et discontinue.....	95
Figure V.7: Variation du taux d'absorption des différents types du béton à 28 jours (granularité discontinue).....	98

Figure V.8: Variation du taux d'absorption des différents types du béton à 28 jours (granularité continue).....	99
Figure V.9: Comparaison du taux d'absorption d'eau entre les différents types du béton à 28 jours.....	100
Figure V.10 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 7 jours (granularité discontinue).....	101
Figure V.11 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 14 jours (granularité discontinue).....	101
Figure V.12 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 28 jours (granularité discontinue).....	101
Figure V.13 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 7 jours (granularité continue).....	101
Figure V.14 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 14 jours (granularité continue).....	101
Figure V.15 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 28 jours (granularité continue).....	101
Figure V.16 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique I_s à 14 jours (granularité discontinue).....	102
Figure V.17 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique I_s à 28 jours (granularité discontinue).....	102
Figure V.18 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique I_s à 14 jours (granularité continue).....	102
Figure V.19 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique I_s à 28 jours (granularité continue).....	102
Figure V.20 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (I_s/V) à 14 jours (granularité discontinue).....	103
Figure V.21 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (I_s/V) à 28 jours (granularité discontinue).....	103
Figure V.22 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (I_s/V) à 14 jours (granularité continue).....	103
Figure V.23 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (I_s/V) à 28 jours (granularité continue).....	103
Figure V.24 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la vitesse d'ultrason à 28 jours (granularité discontinue).....	104

Figure V. 25 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la vitesse d'ultrason à 28 jours (granularité continue).....	104
Figure V. 26 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité discontinue).....	105
Figure V. 27 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité continue).....	105
Figure V. 28 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression à 28 jours (granularité discontinue).....	105
Figure V. 29 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression à 28 jours (granularité continue).....	105
Figure V. 30 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et la vitesse du son à 28 jours (granularité discontinue).....	106
Figure V. 31 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et la vitesse du son à 28 jours (granularité continue).....	106
Figure V. 32 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité discontinue).....	107
Figure V. 33 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité continue).....	107
Figure V.34 : Estimation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la vitesse d'ultrason suivant les différentes approches.....	108
Figure V.35 : Estimation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'indice sclérométrique suivant les différentes approches.....	109
Figure V.36 : Approches proposées de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son et l'indice sclérométrique.....	110

Notations :

END : essais non destructifs.

C : ciment.

E : eau.

E/C : rapport eau sur ciment.

C : classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds.

LC : classe de résistance des bétons légers.

L : longueur de parcours.

T : le temps.

V : la vitesse de propagation.

ν : Coefficient de poisson.

E_d : module d'élasticité dynamique.

I_s : indice sclérométrique.

D_{max} : Diamètre maximal du gros granulat.

V : volume.

γ : masse volumique absolue.

ρ : masse volumique apparent.

P(%) : porosité.

C(%) : compacité.

$e(\%)$: indice des vides.

$P_c(\%)$: porosité à l'état compacte.

$C_c(\%)$: compacité à l'état compacte.

$e_c(\%)$: indice des vides à l'état compacte.

$P_L(\%)$: porosité à l'état lâche.

$C_L(\%)$: compacité à l'état lâche.

$e_L(\%)$: indice des vides à l'état lâche.

L_A : coefficient de Los Angeles.

A (%) : degré d'absorption.

M_H : La masse du matériau saturé d'eau.

M_S : La masse du matériau sec.

M_f : module de finesse du sable.

E_{sv} : équivalent de sable visuel.

E_{sp} : équivalent de sable par piston.

γ_c : masse volumique à l'état compacte.

γ_L : masse volumique à l'état lâche.

R_{c28} : résistance à la compression à 28 jours.

R_c : activité du ciment.

R_u : résistance par ultrason.

R_s : résistance par scléromètre.

R_{us} : résistance combiné.

R_b : classe du béton.

PC : pierres concassées.

G : gravier.

S : sable.

A, A' : coefficients de la qualité des granulats et des liants.

α : coefficient d'écartement.

C_{d20} : béton de classe de résistance de 20 MPa à granularité discontinue.

C_{c20} : béton de classe de résistance de 20 MPa à granularité continue.

(C_d) : béton à granularité discontinue.

(C_c) : béton à granularité continue.

Chapitre I :

Introduction générale

I. Introduction générale :**I.1 problématique :**

La caractérisation des bétons au laboratoire est une tâche lourde, et parfois impossible pour connaître les propriétés à l'état durci des bétons des ouvrages existants dans des situations spéciales.

Malheureusement, les éprouvettes testées ne donnent pas toujours des résultats fidèles et représentatifs du béton réellement mis en place d'un ouvrage réalisé, les moyens les plus appropriés sont donc les essais non destructifs (END), dans le sens d'une évaluation économique et réaliste donnant une approche satisfaisante de la qualité des bétons.

De nombreuses recherches sont en cours par la communauté scientifique, en se basant surtout sur une caractérisation mécanique des bétons par les essais non destructifs, les approches développées dans cet axe restent limitées par le nombre assez réduit des paramètres des différentes études de caractérisation des bétons.

Nous considérons à travers notre approche, que le volet comportement mécanique pris en compte au même temps avec le volet propriétés physiques du béton consistera une évaluation globale et plus fiable de la qualité du béton.

Les performances mécaniques d'un béton, liées à son pouvoir de durabilité, nous donnent une identification objective du matériau.

I.2 Objectifs :

L'objectif principal de cette étude est la caractérisation physique et mécanique des bétons fabriqués selon les conditions locales en utilisant les méthodes non destructives.

A la lumière de cette vision, les objectifs tracés dans la présente étude sont donc :

1. Contribution à l'étude de caractérisation des bétons aux moyens des essais non destructifs.
2. Evaluation de la qualité globale des bétons à travers une estimation physique et mécanique.

3. Corrélation entre les différentes propriétés des bétons, afin d'arrêter des modèles reliant les paramètres mesurés à ceux estimés.
4. Proposition des relations mathématiques donnant une estimation des propriétés physiques et mécaniques des bétons en fonction des paramètres de l'évaluation non destructive.

Pour la réalisation de ces objectifs dans une vision détaillée, nous avons tracé le programme des tâches suivant :

- ◆ Voir l'influence des conditions locales sur la qualité du béton.
- ◆ Étudie l'influence des conditions locales sur les résultats des essais non destructifs et essais destructifs.
- ◆ Voir l'influence de la granularité (continue et discontinue) sur les résultats des essais non destructifs et essais destructifs.
- ◆ Voir l'influence des propriétés physiques sur la réponse mécanique du béton.
- ◆ Voir l'influence des classes du béton sur les résultats des essais non destructifs et essais destructifs.

I.3 Structure du mémoire :

Chapitre I :

Introduction.
Problématique.
Objectif.
Contenu du mémoire.

Chapitre II :

Béton et constituant.

Chapitre III :

Les essais non destructifs.
Recherches existants.

Chapitre IV :

Matériaux, matériels et essais.

Chapitre V :

Etude statistique.
Résultats et discussions.
Comparaison.

Chapitre VI :

Conclusion et perspectives.

Chapitre II:
Béton
et
constituants

II.1 Introduction général :

Sans aucun doute, le béton est un matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Ces propriétés physiques, économiques et notamment mécaniques permis aux architectes et ingénieurs de génie civil de libérer ses idées et ses imaginations en des ouvrages et édifices réels.

Dans ce deuxième chapitre, en va faire un aperçue général sue le béton et ces composantes et voire quelque caractéristiques essentielles du béton.

II.2 Qu'est-ce que le béton ?

Le béton est un mélange de plusieurs composants :

Ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble hétérogène.

Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 ; les dimensions de leurs grains se graduent de 0,5 μm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons).

La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci. [1]

Tableau II.1 : *Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant.[1]*

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
En volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
En poids (%)	5-9	--	9-18	65-85

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants. [2]

II.3 Historique :

L'ingénieur Bélidor, auteur de L'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 préparent l'avènement du béton. Les premières cimenteries se développent en France entre 1850 et 1860, dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français.

C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor. Le premier exemple est la barque de Lambot (1848), le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris (1898).

Au XX^e siècle, le béton se développera considérablement et, parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet.

Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment, ou en génie civil. [2]

II.4. Constituants du béton :

II.4.1. Le ciment :

C'est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. [3]

II.4.1.1 Généralité sur les ciments courants :

a. Le clinker :

Le clinker est le constituant principal du ciment courant, il peut être ajouté d'autres constituants tel que le laitier, la pouzzolane, les fines de calcaires et autres ajoutes minérales.

L'addition de ces ajoutes minérales est dans le but de modifier certaines des propriétés du ciment afin de créer des produits adéquates, répondre aux différents exigences et problèmes rencontrer lors de la réalisation de certaines ouvrages.

De plus, la réutilisation de certains déchets tels que le laitier comme ajout pour la fabrication du ciment favorise plusieurs atouts économiques et environnementaux. [3,4]

b. Composition minéralogique du clinker :

Le clinker est le résultat de la cuisson à 1450°C environ d'un mélange constitué principalement de calcaire, d'argile et autres matières de correction. Il se présente sous forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases inscrits dans le tableau suivant :

Tableau II.2: *Composition minéralogique du clinker.* [3]

Constituant	Alite (C ₃ S)	Bélite (C ₂ S)	Célite (C ₃ A)	Férrite (C ₄ AF)
Composition chimique	Silicate tricalcique 3CaO.SiO ₂	Silicate bicalcique 2CaO.SiO ₂	Aluminate tricalcique 3CaO.Al ₂ O ₃	Alumino-férrite tétracalcique 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Teneur (%)	50-75	7-30	0-18	4-20

c. Fabrication des ciments :

Le processus de fabrication du ciment est très compliqué, sans vouloir entrer dans les détails on va essayer de présenter les phases majeures de la fabrication des ciments courants. [4]

d. Extraction et broyage :

Cette phase consiste en général à abattre la roche par des explosifs au niveau des carrières, afin de fragmenter les grandes blocs pour faciliter le transport et le broyage des matières primaires.

Le broyage a pour but de limiter la granulométrie à 50 voire 100 mm au maximum, puisque les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières. [3,4]

e. Préparation de cru :

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80% de calcaire pour 20% d'argile, le résultat final est l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre :

[65 - 70]% de chaux (CaO).

[18 - 24]% de silice (SiO₂).

[04 - 08]% d'alumine (Al₂O₃).

[01 - 06]% d'oxyde ferrique (Fe₂O₃).

Et autres. [3,4]

f. La cuisson :

De 8m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur, le four rotatif permet la cuisson du cru à une température comprise entre 1400 et 1500°C à fin de la transformer en clinker, l'opération se déroule comme suite :

- ✓ Le préchauffage à l'amont du four, favorise le séchage total du cru ;
- ✓ A 500°C, la décomposition des argiles ;
- ✓ A 950°C, la décarbonatation des calcaires dans la partie médiane du four ;
- ✓ A 1450°C, la clinkérisation qui s'effectue en partie aval du four près du bruleur. [3,4]

g. Le broyage :

Après le refroidissement du clinker, l'opération du broyage vise deux objectifs majeurs qui sont :

D'une part, de réduire les grains de clinker en farine de ciment,

D'autre part, de procéder à l'ajout du gypse, ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants tels que le laitier, cendres volantes, pouzzolane et autres, ce qui permet d'obtenir les différentes types de ciments normalisés. [4]

h. Stockage et expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment prêt à être utilisé est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac vers le marché. [4]

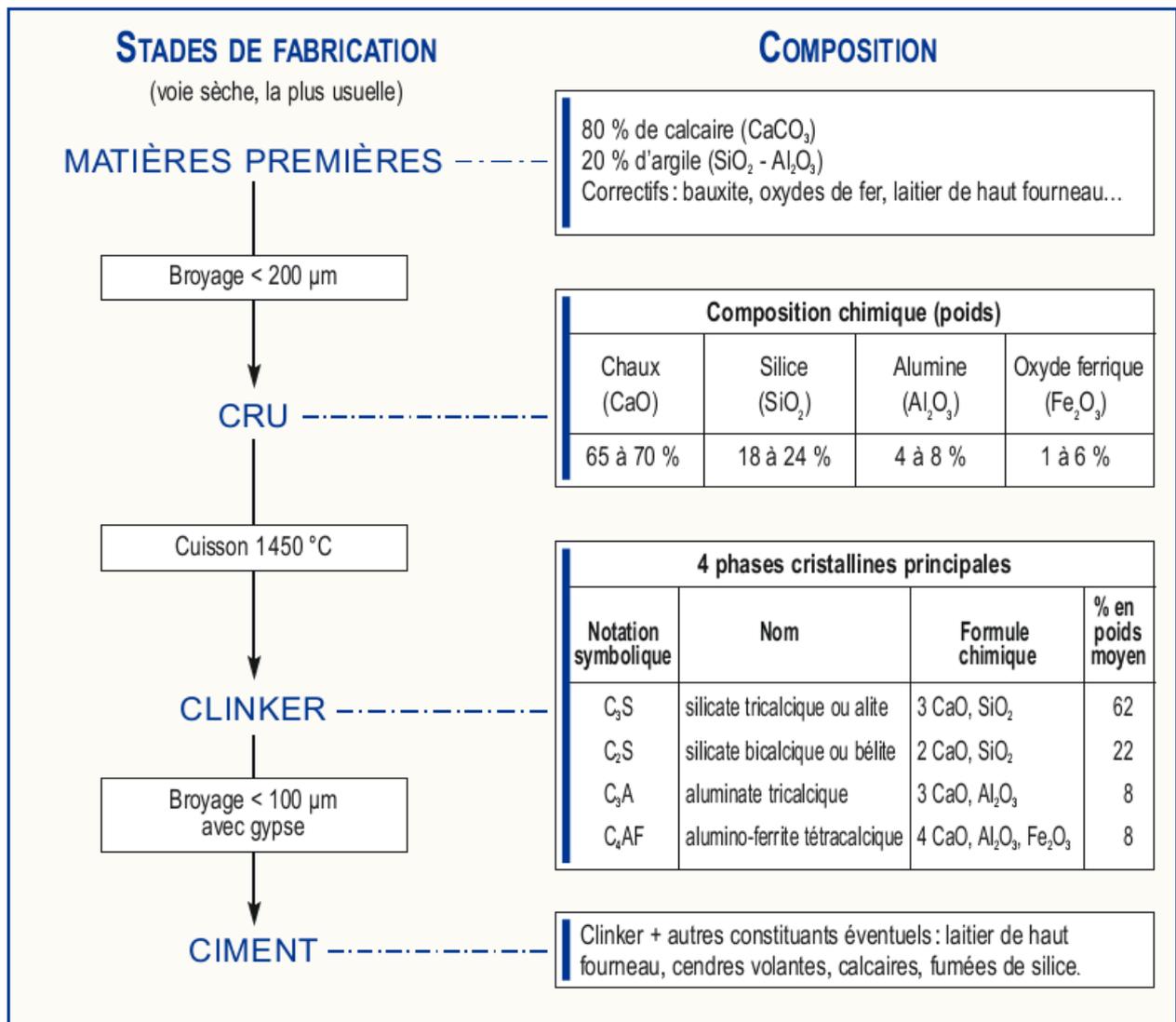


Figure II.1 : schématisation des différentes taches de la fabrication des ciments courants. [5]

II.4.1.2. Types de ciment :

L'ensemble des ciments est fabriqué à partir de clinker et d'ajouts minéraux. La transcription nationale de la norme européenne NF EN 197-1 et la norme française NF P15-301, définit les proportions de chaque constituant pour cinq types de ciments industriels.

- CEM I: Ciment Portland;
- CEM II: Ciment Portland composé;
- CEM III: Ciment de haut fourneau ;
- CEM IV: Ciment pouzzolanique ;
- CEM V: Ciment composé.

Les proportions des différents constituants prévues par la norme pour chaque classe de ciment sont présentées au Tableau (II.3).

Dans le cadre de ce travail, le ciment CEM II a été choisi car il rentre dans la constitution des cinq classes de ciment et par conséquent il est utilisé de façon quasi universelle pour les bétons de construction. [3,5]

II.4.1.3 Classification des ciments :

a. Classification selon la composition :

Cinq types principaux sont décrits par les normes NF P15-301 et ENV 197-1 comme suite :

Tableau II.3 : Les cinq types de ciment courants et leur composition. [3,4]

Type de ciment	Notation	Clinker (%)	Autres constituants (%)	Constituants secondaires(%)
Ciment portland	CEM I	95 -- 100	--	00 – 05
Ciment portland composé	CEM II A	80 – 94	06 – 20	
	CEM II B	65 – 79	21 – 35	
Ciment de haut fourneau et de laitier	CEM III A	35 – 64	36 – 65	
	CEM III B	20 – 34	66 – 80	
	CEM III C	05 – 19	81 – 95	
Ciment pouzzolanique	CEM IV A	65 – 90	10 – 35	
	CEM IV B	45 – 64	18 – 30	
Ciment composé	CEM V A	40 – 64	18 – 30	
	CEM V B	20 – 39	31 -- 50	

b. Classification selon la classe de résistance :

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, les normes spécifiant une limite inférieure

et une limite supérieure dont les valeurs et quelques propriétés physiques sont ordonnés dans le tableau ci-dessous.

Les classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines situations telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication...

Tableau II.4 : Classes de résistance selon la norme NF- P15 -101-1. [3,4,6]

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32.5	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 10.0	-		
42.5	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20.0	-		
52.5	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-
52.5R	≥ 30.0	-		

c. Les autres ciments :

D'autres ciments font l'objet de normes spécifiques :

- Le ciment prompt naturel (CNP) NF P 15-314 ;
- Le ciment alumineux fondu (CA) NF P 15-315 ;
- Le ciment à maçonner (MC) NF EN 413-1 ;
- Les ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15-317 ;
- Les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15-319 ;
- Les ciments à teneur en sulfures limitée (CP) NF P 15-318. [3, 4,6]

II.4.1.4 Marquage des sacs du ciment :

Les inscriptions portées sur les sacs comportent :

- ✓ Le type du produit ;
- ✓ L'indication de la norme à laquelle il se réfère ;
- ✓ La classe de résistance ;
- ✓ Caractéristiques complémentaires éventuelles. [4]

A titre d'exemple, le marquage dans la figure (II.2) ci-après, concerné un ciment résistant aux sulfates (CRS), contient entre 35 à 64% de clinker et entre 65 à 36% de Laitier de haut fourneau, de classe de résistance 42.5 MPa normal, reconnue apte pour les travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) et confirmer à la norme Algérienne : NA 443. [7]

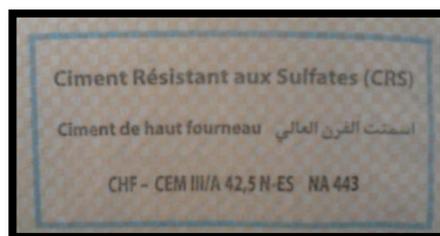


Figure II.2 : Ciment résistant aux sulfates MOKAWIM de HAMAM DHALAA M'sila.



Figure II.3 : Ciment portland composé MATIN de HAMAM DHALAA M'sila.



Figure II.4 : Ciment portland composé de AIN LEKBIRA Sétif.

II.4.1.5 Le choix de type de ciment :

Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs). Sans détailler les critères de choix du ciment on peut rappeler quelques règles.

- ◆ Pour un béton courant, on utilise des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C, ou CEM V, alors que le ciment à maçonner et la chaux hydraulique sont réservés à la préparation de mortiers pour maçonneries.
- ◆ Pour des travaux en ambiance agressive, on utilise des ciments pour travaux à la mer PM, norme NF P 15-317, ou des ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES, norme NF P 15-319.
- ◆ Le ciment prompt naturel et le ciment d'aluminates de calcium fondu sont utilisés pour leur durcissement rapide (réparations par exemple), mais aussi pour leur résistance aux ambiances agressives.
- ◆ La classe R est utilisée chaque fois que l'on cherche des résistances élevées au jeune âge : préfabrication avec cycle de démoulage court, bétonnage par temps froid. [2]

II.4.2 Les granulats :

Les granulats sont les plus gros constituants du béton, et peuvent provenir de différentes roches inertes (silico-calcaires, basaltes, granites, . . .). Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils représentent environ 85% en masse du béton complet.

Les granulats doivent être des matériaux de qualité et satisfaire notamment deux exigences :

- ◆ la propreté, particulièrement importante pour les sables ; la teneur en fines argileuses est strictement limitée ;
- ◆ la granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent permettre d'une part de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures. Au voisinage des parois, il est nécessaire de limiter la taille maximale des grains. [4,8]

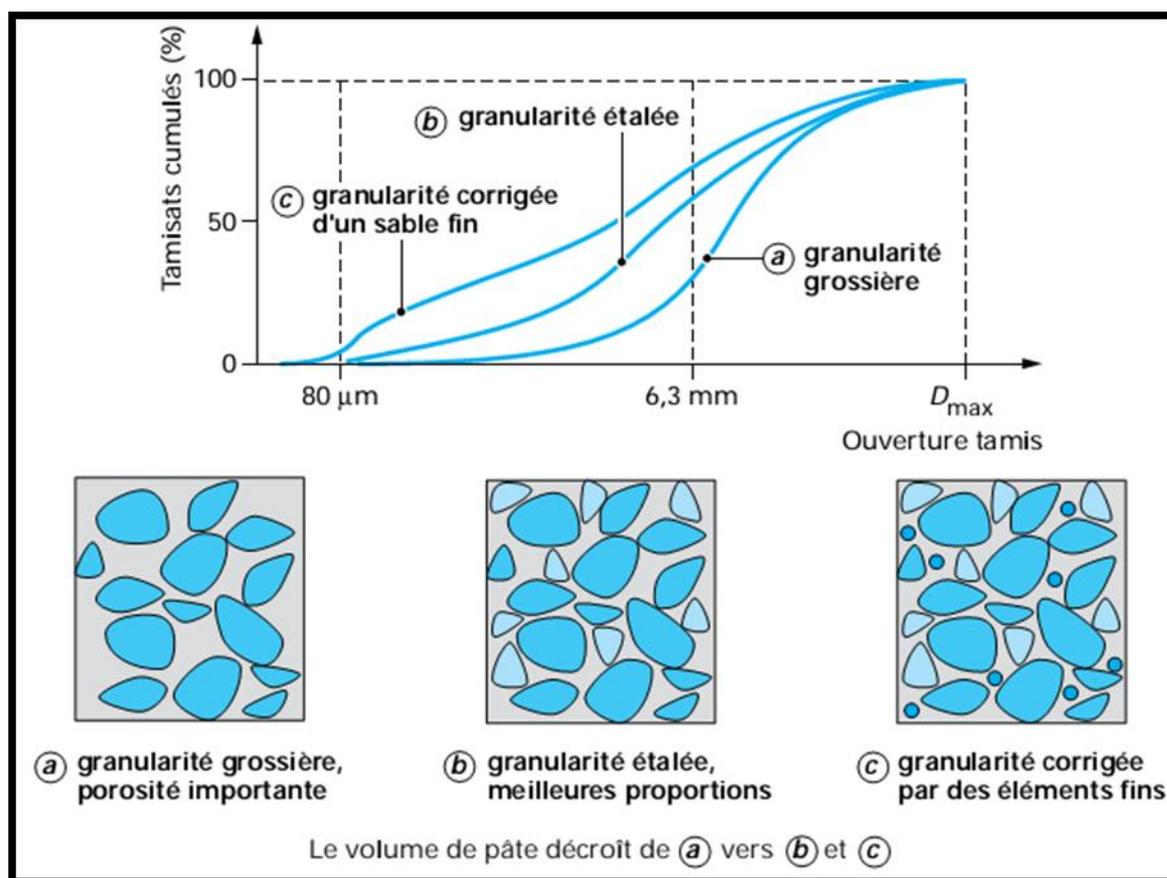


Figure II.5 : Compacité d'un béton en fonction de la granulométrie du squelette granulaire. [9]

II.4.2.1 Les types des granulats :

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

a. Granulats naturels :

D'origine minérale, issus de roches meubles ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). [1]

b. Granulats artificiels :

Lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ; [1]

c. Granulats recyclés :

Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments. [1]

II.4.2.2 Classes granulaires :

Un granulat est caractérisé par sa classe d/D; d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains.

La norme NFP18-101 indique la terminologie des granulats selon leurs dimensions:

Tableau II.5: Les différentes classes granulaires. [1]

terminologie des granulats	Classe granulaire	Dimension (mm)
Fillers	0/D	$D < 2$
Sablons	0/D	$D \leq 1$
Sables	0/D	$1 < D \leq 6,3$
Graves	0/D	$D > 6,3$
Gravillons	d/D	$d \geq 1$ et $D \leq 125$
Ballasts	d/D	$d \geq 25$ et $D \leq 50$

II.4.2.3 Les gros granulats (graviers):

a. Les granulats de rivière :

Ils proviennent de la désagrégation des roches, ils sont en général très durs et très propres, cependant, leurs grains après le frottement n'offrent pas une très bonne adhérence au liant. [10]

b. Les granulats concassés :

Ils sont obtenus en concassant des roches dures (siliceuses, calcaires ou granitiques). Les grains sont anguleux, ils doivent être soigneusement lavés pour les débarrasser des poussières qui les recouvrent au moment du concassage. [10]

II.4.2.4 Les granulats fins (Sable) :

a. Sables de rivière :

Il est extrait par dragage du lit des cours d'eau (matériaux siliceux). Il est bon parce qu'il est bien lavé mais sa forme rondo facilite les mouvements et diminue son adhérence aux mortiers et béton. Le sable gypseux est à éliminer. [10]

b. Sable de mer :

Il provient de la désagrégation des roches sous-marines ou des falaises sous l'action des mouvements des eaux. Il est pur et excellent s'il n'est pas trop fin, il est chargé de sel.

Avant l'utilisation on doit le laver à l'eau douce pour le purifier ou le laisser exposé aux intempéries pendant un certain temps.

Afin de le débarrasser au maximum des sels marins qu'il contient. Ces sels sont susceptibles de réagir en présence des liants (ciment). [10]

c. Sable de dune :

Ce sable est de qualité convenable pour la construction, car il est constitué d'éléments très fins (faible résistance mécanique de béton). Il provient d'éléments de désagrégation de roches transportées par le vent. [10]

d. Sables de carrière :

Il doit être lavé avant usage pour éliminer les matières terreuses. Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable en l'empêchant d'adhérer aux liants.

Le sable quartzeux exempt de matières terreuses ou argileuses est excellent pour la confection du béton et mortier. On peut dire que le meilleur sable qui frotté entre les doigts donne un petit bruit sec. [10]

II.4.3 L'eau de gâchage :

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'exagère pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours par contre le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé.

La quantité d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats et consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 115 et 215 l/m³. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. [6]

II.4.3.1 Classification des types d'eau :

En général, l'aptitude à l'emploi de l'eau pour la production de béton dépend de son origine. Les types suivants peuvent être distingués :

a. Eau potable :

Cette eau est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai. [12]

Dans notre travail, en va utiliser l'eau potable disponible au niveau de notre université.

b. Eaux d'origine souterraine :

Ces eaux peuvent être appropriées, mais doivent être soumises à des essais. [12]

c. Eaux naturelles de surface et eaux de rejet industrielles :

Ces eaux peuvent être appropriées, mais doivent être soumises à des essais. [12]

d. Eau de mer et eaux saumâtres :

Ces eaux peuvent être utilisées pour la production de béton non armé, mais ne conviennent pas en général à la production de béton armé ou précontraint. [12]

e. Eaux usées :

Ces eaux ne conviennent pas pour la fabrication du béton. [12]

II.4.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés. Ils améliorent les propriétés des bétons auxquels ils sont ajoutés. [6]

Par exemple, l'emploi des plastifiants réducteurs d'eau et des superplastifiants facilite la mise en place du béton dans les pièces minces fortement armées, ainsi que la réalisation des Bétons à Hautes Performances. [11]

Les accélérateurs de prise facilitent le bétonnage par temps froid, tandis que les retardateurs de prise sont utiles pour le bétonnage par temps chaud. [11]

II.5 Formulation du béton :

Le béton est constitué de deux parties essentielles, d'une pâte de ciment (ciment + eau) et des granulats (sable + gravillon).

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange de ces différents constituants pour obtenir un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage à réaliser.

Presque toujours, il s'agit de rechercher deux qualités essentielles qui sont la résistance mécanique à 28 jours R_{c28} et l'ouvrabilité. Néanmoins, il n'existe pas une composition type, mais des méthodes de composition (FAURY, BOLOMEY, VALLETTE, DREUX-GORISSE, SKRAMTAIVE...). Elles sont toutes basées sur une adaptation de résultats expérimentaux.

Dans notre travail, on va procéder à la méthode de SKRAMTAIVE, car elle est plus pratique.

Ces méthodes sont dites à « granularité continue » lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue ; autrement dit du plus petit grain de ciment aux plus gros grains (D) des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées. [4]

On dit par contre que l'on a une « granularité discontinue » lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires. [4]

La granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastique et de bonne ouvrabilité ; par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant en général des résistances en compression un peu supérieure mais parfois au détriment de l'ouvrabilité. Cependant, on peut estimer que pratiquement la plupart des bétons actuellement utilisés la granularité continue. [4]

Le choix de la formulation permet d'obtenir des propriétés mécaniques ou de mises en œuvre recherchées. L'eau du mélange hydrate progressivement le ciment. La pâte de ciment hydratée forme alors un matériau poreux qui solidarise le sable et les granulats entre eux et le matériau acquiert ses propriétés mécaniques. On appelle « cure » le moyen utilisé pour protéger le béton des échanges avec l'extérieur (en particulier le séchage) afin d'assurer la prise puis le durcissement de manière optimale, la cure est particulièrement

importante pendant le jeune âge du béton. On considère traditionnellement que les propriétés mécaniques finales du béton sont atteintes au bout de 28 jours. [8]

Ces propriétés évoluent en fait continûment et ne peuvent être considérées comme réellement stabilisées qu'au bout de 90 jours ou plus. [8]

Le rapport de la quantité massique d'eau sur celle du ciment (appelé rapport E/C) joue un rôle important sur les propriétés mécaniques du béton. Un béton ayant un rapport E/C élevé sera plus aisé à mettre en œuvre, cependant, l'espacement entre les grains de ciment sera plus grand du fait de la quantité d'eau d'hydratation et la porosité finale de la pâte de ciment sera plus importante. A l'inverse un rapport E/C faible donnera un béton plus compact avec meilleures propriétés mécaniques mais une ouvrabilité plus faible. Ce rapport E/C est en général compris entre 0,3 et 0,9 pour les cas les plus extrêmes. [8]

II.6 Classification des bétons :

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière de résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. [1]

a. Classification des bétons en fonction de leurs masses volumiques:

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique:

- Béton très lourd: $> 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant): $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton léger: $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$.
- Béton très léger: $< 500 \text{ kg/m}^3$. [1]

b. Classification des bétons en fonction de leurs résistances mécaniques:

La résistance des bétons durcis à 28 jours peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, elle peut donc être définie par les deux valeurs suivantes.

fck-cyl : Résistance caractéristique en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques (trois dimensions sont retenues) :

($\emptyset=150 \text{ mm}$ et $H = 300 \text{ mm}$; $\emptyset=160 \text{ mm}$ et $H = 320 \text{ mm}$; $\emptyset=110 \text{ mm}$ et $H = 220 \text{ mm}$.)

fck-cube: Résistance caractéristique en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150 mm).

La norme NF EN 206-1 propose deux familles de classes de résistance en fonction de la masse volumique du béton, qui correspondent à la résistance caractéristique que doit atteindre le béton à 28 jours :

◆ La classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre **C** suivie des valeurs fck-cyl et fck-cube ;

◆ La classe de résistance des bétons légers est désignée par les lettres **LC** suivies des valeurs fck-cyl et fck-cube.

Elle définit respectivement seize classes de résistance pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds de C 8/10 à C 100/115 et quatorze classes pour les bétons légers de LC 8/9 à LC 80/88. Les bétons légers sont classés selon 6 plages de masse volumique. Par exemple, la classe de résistance C 30/37 correspond à une résistance caractéristique de 30 MPa sur cylindre et 37 MPa sur cube. [1]

Tableau II.6 : *Classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds.* [1]

Classe	fck-cyl (MPa)	fck-cube (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tableau II.7 : Classes de résistance à la compression pour les bétons légers. [1]

Classe	fck-cyl (MPa)	fck-cube (MPa)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

II.7 Caractéristiques du béton :

II.7.1 A l'état frais :

Le temps pendant lequel le béton reste frais est insignifiant par rapport à sa durée de vie totale. Pourtant, au cours de ce temps, beaucoup d'opérations s'effectuent: malaxage, mise en place, serrage, etc. Ces opérations, dépendant notamment du comportement des bétons à l'état frais, influencent en fait la plupart des qualités de l'ouvrage:

Compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, apparence des parements, étanchéité, etc. Ainsi, l'étude du comportement des bétons à l'état frais, présente un grand intérêt industriel. [14]

a. Maniabilité (ouvrabilité) :

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage.

Pour étudier la maniabilité il faut étudier la fluidité. [15]

b. Fluidité :

La fluidité est évaluée par la capacité du béton de couler sous l'action de poids propre, ou d'une vibration. Il existe plusieurs essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité :

- ◆ Affaissement ou cône d'Abrams «slump-test» EN 18-451.
- ◆ Etalement à la table à secousses «flow-test» EN 12-358
- ◆ Essai vébé «essai de consistance» ISO 4410.

c. Gamme de consistance des bétons frais :

La consistance représentant l'aptitude à la mise en œuvre (ouvrabilité) et mesurée par un test de plasticité : l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. [15]

Tableau II.8 : Affaissement cône d'Abrams. [15]

Affaissement (cm)	≤ 4	5 à 9	10 à 15	16 ≥
Consistance	Ferme	Plastique	Trais plastique	Fluide
Notation	F	P	TP	F1

d. Ressuage :

Avant la prise l'apparition d'une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Cette remontée et liée au tassement sous l'effet de leur poids des éléments solide (ciment granulats) qui composent le matériau. Il favorise une cure naturelle du béton et évite la dessiccation précoce et le retrait plastique, et malheureusement, il causé un chute d'adhérence pâte-granulats et béton-armatures qui provoque un chute de résistance. [15]

e. Ségrégation :

C'est la séparation des petits et des gros grains dans le béton lors de différente manutention et en particulier de transport, la ségrégation conduit à l'hétérogénéité du béton et par conséquent à la l'abaissement de la résistance. [15]

II.7.2 A l'état durci :

a. Porosité :

La porosité du béton est le degré de remplissage de son volume par les pores d'air ou d'eau, ils peuvent être fermé ou ouverts ayant des dimensions plus au moins grandes.

On peut retenir les valeurs suivantes pour les bétons traditionnels :

Tableau II.9 : Valeurs moyennes de porosité totale. [15]

Qualité de béton	Porosité en % de volume
Excellent	10 à 11
Satisfaisant	12 à 15
Médiocre	16 à 18
Mauvais et très mauvais	> 22

Les pores sont constitués sous trois géométries principales qui sont :

- ◆ Pores capillaires interconnecté, qui forment un espace continue dans les réseaux poreux ;
- ◆ Pores isolés, qui ne communiquent pas avec l'environnement ;
- ◆ Pores aveugles ou bras morts, qui sont interconnecté d'un seul côté.

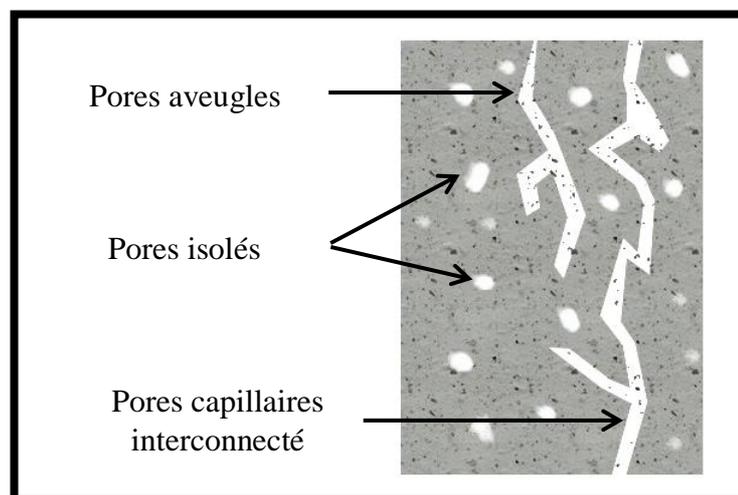


Figure II.6 : Différents types des pores. [16]

Les études de Féret (début du XX^e siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton. [2]

La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par :

- ◆ L'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés ; les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,85 : dans 1 m³ de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants, il existe encore 150 litres d'air ou d'eau, constitués notamment par des canaux extrêmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capillaires); [2]

◆ L'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité ; les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de boucher les capillaires. [2]

On améliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau.

La faible porosité d'un béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité.

◆ Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins.

◆ Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre les risques de corrosion. [2]

b. Perméabilité :

C'est l'aptitude de béton à se laisser pénétrer l'eau ou autre liquide sous pressions dépend de plusieurs facteurs :

- ◆ La porosité (distribution et la taille) ;
- ◆ Le rapport E/C ;
- ◆ La compacité ;
- ◆ Régime du durcissement. [16]

c. Le retrait :

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément libre de toute sollicitation mécanique extérieure et dans une ambiance thermodynamique constante. La variation de volume est causée par l'évaporation d'une partie de l'eau de gâchage, qui se traduit par une réduction du volume de pâte de ciment.

En peut distinguer le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturé. La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton.

En effet, elles pouvant être à l'origine de la fissuration, de perte précontrainte, voire de la ruine de l'ouvrage. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ces constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation.

d. Fluage :

C'est phénomène de déformation diffères de béton sous l'effet d'une charge constante, indéfiniment appliquée. [16]

e. Résistance mécanique :

La résistance mécanique est une propriété intrinsèque du béton. Elle détermine dans la plus part des cas les qualités d'un béton.

La résistance d'un béton dépend de l'activité du ciment, du rapport E/C, de la granularité, de degré d'impureté des granulats, de degré de porosité, du mode de cure, etc.

Le béton en service est soumis aux différentes sollicitations d'où en distinguent plusieurs aspects de résistance.

- ◆ Résistance à la compression.
- ◆ Résistance à la traction.
- ◆ Résistance au cisaillement. [16]

II.8 L'interface pâte –granulats :

Toutefois, il ne faut pas oublier qu'un béton classique est constitué d'environ 60 à 75% en volume de granulats. Il est donc nécessaire d'aborder maintenant l'influence de la présence de granulats sur les propriétés générales du béton. [17]

Une première conséquence de la présence de granulats dans la pâte de ciment hydratée est la modification de la microstructure de la pâte autour de ces granulats. Ollivier (1981) et Maso (1982) ont mis en évidence une zone autour du granulat, appelée auréole de transition, présentant une microstructure différente du reste de la pâte de ciment. Cette auréole de transition, d'une épaisseur $\sim 50 \mu\text{m}$, est la partie la plus poreuse, la mieux cristallisée, et la moins résistante dans le béton. Elle est constituée d'un film duplex (composé d'une fine couche d'hydroxyde de calcium adjacente à la surface du granulat entourée

par une couche de C-S-H) et d'une zone de forte porosité contenant des cristaux de portlandite orientés, de l'ettringite, et des aluminates. Les raisons de cette organisation microstructurale sont liées aux effets de paroi lors de l'arrangement des grains de ciment anhydre à la surface des granulats. Bien que la zone de plus forte porosité soit quasi unanimement acceptée par les différents auteurs not pas observé de film duplex. [17]

La seconde conséquence est plus «mécanique». Les différents points abordés ci-après peuvent être approfondis dans :

- ✓ La présence de granulats, plus rigides dans la matrice et moins rigide, amène des concentrations de contrainte (effet de point dur);
- ✓ Les propriétés microstructurales de l'interface en font une zone de faiblesse mécanique;
- ✓ La présence des granulats nuit à la progression des fissures;
- ✓ Lors du retrait, la présence des granulats, en restreignant la déformation, crée de la microfissuration dans la pâte. [17]

La faible résistance mécanique au niveau de l'auréole est due en partie à l'eau piégée sous les granulats. Les études menées sur cette partie montrent que l'interface est constituée de fibres de C-S-H, d'aiguilles d'ettringite, et de plaquettes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ orientées perpendiculairement à la surface du granulat. [17]

II.9 Paramètres influents sur la résistance mécaniques :

Les facteurs principaux qui influent sur le comportement mécanique et morphologique du béton sont représentés dans la figure (II.7). [17]

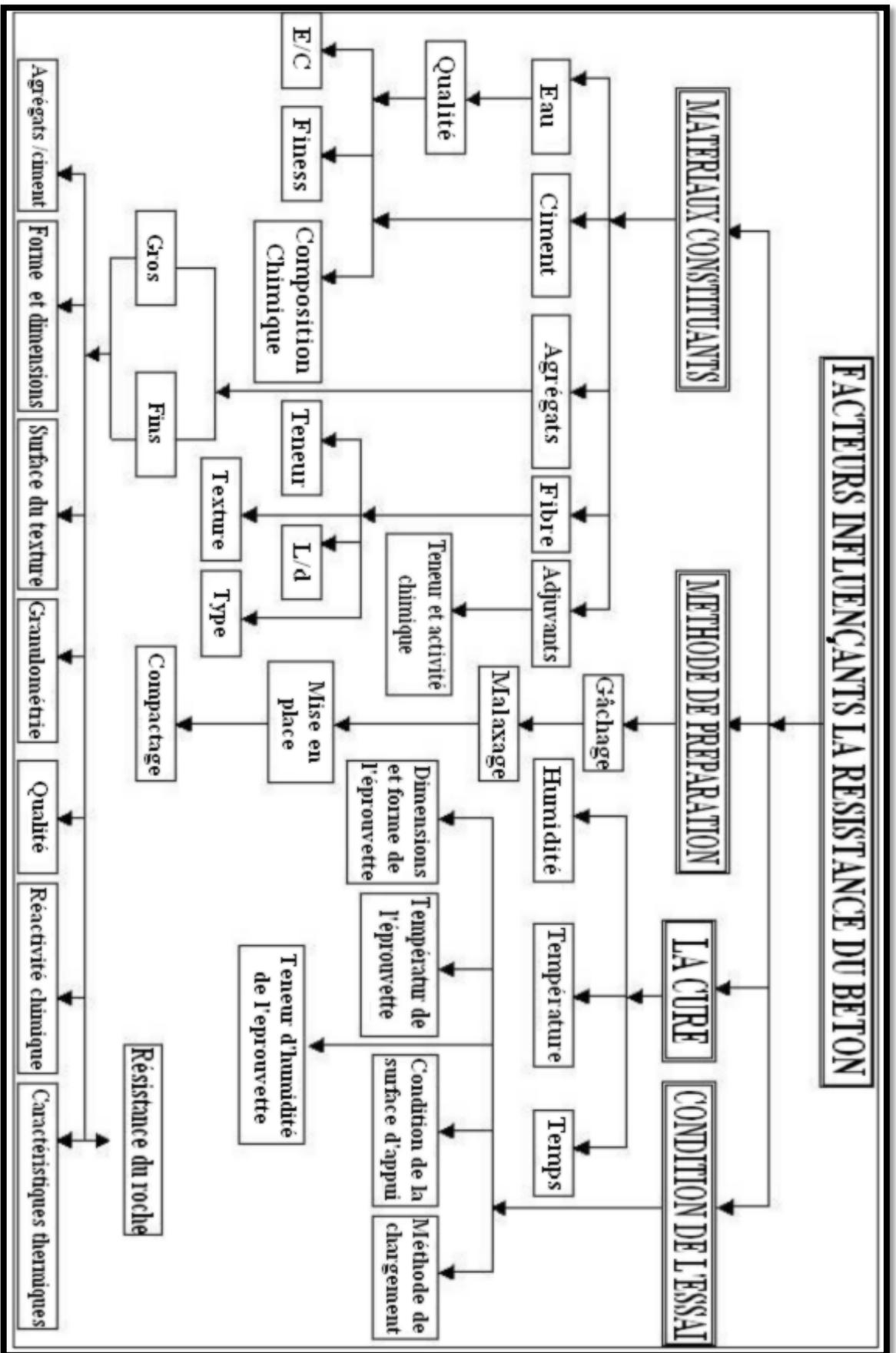


Figure II.7 : facteurs influençant la résistance du béton. [17]

II.10 Conclusion :

Le béton est un matériau complexe et hétérogène, il résulte de la collection de plusieurs constituants, cette complicité rend l'étude et la caractérisation des bétons un peu difficile.

Les constituants entrant dans la composition du béton ont des influences considérables et se manifestent sur le comportement du béton physique ou mécanique.

Les agrégats qui représentent environ 85% en masse du béton complet, ont une influence directe sur le comportement mécanique du béton, car la compacité dépend en premier ordre de la granularité. Plusieurs méthodes de formulation du béton prennent en compte ce paramètre vu sa grande importance.

Chapitre III :

Essais

non

destructifs

III.1 Introduction :

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de cette méthode sont que les résultats ne sont pas obtenus immédiatement; le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car le cure ou le compactage peuvent être différents; ainsi que les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme. [18]

Afin de contourner les inconvénients des méthodes destructives, une gamme d'essais in-situ, appelés essais non destructifs, a été développée, étant entendu que la structure peut être contrôlée sans toutefois modifier, ni sa performance ni son apparence. [19]

Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté, la résistance à la pénétration des projectiles, la capacité de rebondissement et la capacité de transmettre les impulsions ultrasoniques et les rayons X et gamma. [18]

Dans notre travail, on va essayer d'établir des corrélations entre la résistance à la compression et les résultats des essais d'ultrason et scléromètre, ainsi que la caractérisation de quelques propriétés mécaniques et physique du béton.

III.2 Définition de méthodes non destructives :

Ils représentent des méthodes de reconnaissances couramment appliquées aux ouvrages. Comme leur nom l'indique, il s'agit de mesures n'endommageant pas les éléments de structure. Ces essais ont la particularité d'être rapides et faciles à mettre en œuvre. [20]

Les Contrôles Non Destructifs sont un ensemble de méthodes qui permettent l'évaluation de l'état d'intégrité d'un matériau, de structures, ou d'ensembles mécaniques, sans les dégrader

Ils peuvent être appliqués pratiquement à tous les stades de vie d'un élément:

- ◆ Production ;
- ◆ Utilisation ;

- ◆ étude de vieillissement ;
- ◆ maintenance. [21]

III.3 Principales méthodes :

L'utilisation de méthodes dites non destructives applicables in situ est primordiale dans les cas où il est impossible de prélever un échantillon sur la structure, ou si l'on souhaite suivre l'évolution d'une caractéristique au cours du temps. Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées ci-après. [21]

a. Mesures semi destructives :

Une série de méthodes permet d'évaluer in situ la résistance mécanique en surface du béton. Leur utilisation est assez répandue et est normalisée (norme européenne EN 13791).

Des scléromètres permettent de mesurer la dureté de la surface de béton. La hauteur de rebond d'une masse projetée avec une certaine vitesse sur la surface du béton permet de remonter à la résistance en surface du béton. Cet appareil ne donne qu'une information locale sur les propriétés du béton. [22]

D'autres méthodes telles que les essais de résistance à la pénétration (sonde Windsor) ou des essais d'arrachements d'une tige métallique scellée dans le béton (pull-out) fournissent également des informations locales sur la résistance à la compression du béton en surface. Ces méthodes sont partiellement destructrices car elles laissent des impacts et des trous dans le parement que l'on peut reboucher facilement. [22]

Ces méthodes sont couramment utilisées sur les ouvrages et peuvent donner des informations très utiles aux maîtres d'œuvres. Cependant, la précision reste faible et l'information n'est que locale. [22]

b. Mesures non destructives « utilisant la propagation d'ondes » :

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes et l'interaction de ces ondes avec le béton sont parmi les méthodes ayant le plus grand potentiel pour l'évaluation non destructive du béton. En effet, les propriétés de la propagation des ondes sont directement liées aux propriétés du matériau dans lequel elles se propagent. Ces ondes peuvent être de type électromagnétique ou mécanique et sont sensibles à des propriétés différentes du béton. Elles peuvent être utilisées pour obtenir des informations à différentes échelles (millimétrique,

centimétrique, ou de l'ordre de la dizaine de centimètres) en fonction de la longueur d'onde utilisée. [22]

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes électromagnétiques sont les méthodes capacitives, résistives, ou les méthodes GPR (Ground Penetration Radar). Les ondes électromagnétiques à basse fréquence peuvent être utilisées pour détecter des éléments métalliques, et permettre de localiser les armatures d'acier et d'en estimer le diamètre, ou la profondeur. Les gaines métalliques des câbles de précontraintes peuvent également être localisées, ou encore la présence des vides de grandes dimensions dans le béton (phénomène de « nid de cailloux ». Ces ondes sont sensibles aux constantes diélectriques du milieu, et peuvent être utilisées à plus hautes fréquences pour remonter, après étalonnage, à la teneur en eau. [22]

Les méthodes utilisant des ondes mécaniques se basent sur la propagation d'ultrasons dans le béton. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson, ou encore le taux de porosité. Les méthodes les plus couramment employées à ce jour sont l'impact écho, l'auscultation sonore « pulse velocity » et l'émission acoustique. On peut également citer les méthodes basées sur la tomographie sismique ou les ondes de surface mais qui sont moins utilisées. Les ondes acoustiques peuvent être employées pour détecter des fissures, des vides, ou mesurer des épaisseurs. Les caractéristiques mécaniques du béton peuvent également être évaluées après étalonnage.

Ces deux familles de méthodes fournissent des informations complémentaires mais néanmoins corrélées. La suite de ce travail porte uniquement sur la propagation des ondes mécaniques dans le béton. [21]

Dans notre étude, on s'intéresse que des essais d'ultrason et scléromètre afin de pouvoir caractériser notre béton et établir des corrélations entre les résultats obtenus par ces essais et la résistance à la compression.

III.4 Avantages et inconvénients des essais non destructifs :

Les essais non destructifs nous apportent plusieurs bénéfices et satisfaction, d'un point de vue de rapidité d'où on peut obtenir des résultats dans quelques instants sur l'état de santé, des performances mécaniques ou des propriétés physiques d'une structure déjà existante. Un autre avantage réside dans le fait que ces méthodes nous permettent d'effectuer un nombre

d'essais pratiquement infinis sur un même échantillon et de ce fait, économisé du matériau testé, ce qui rend ces méthodes plus économique et moins couteuse à c'elles destructifs.

Le désavantage essentiel de ces essais non destructifs est que les résultats obtenus ne sont pas à 100% fiables, car plusieurs facteurs influents ces derniers tel que la composition du béton et ces constituants, l'état de la surface testé, la façon de la mesure, la présence ou non des armatures, l'humidité et autres. [19]

III.5 Essai d'auscultation sonique : EN 12504-4

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises (EN 12504-4) et américaines (ASTM-C597-02), et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures. [21]

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur. Cette méthode permet principalement de détecter :

- ◆ Une non uniformité des propriétés de la structure ;
- ◆ Des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de « nids de cailloux » ;
- ◆ La détérioration due au feu, au gel ou à des agressions chimiques... [23]
- ◆ Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations. [23]

Cependant, la vitesse mesurée dépendant également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par l'essai destructif de compression en laboratoire. [24]

III.5.1 Principe de l'essai :

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément de béton à contrôler. Après avoir passé une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrason (T). [19]

La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule :

$$V = L/T \dots\dots(III.1)$$

III.5.2 Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons :

III.5.2.1 Mesures en transparence directe :

Utilisées dans le cas des éprouvettes ou de poteaux ou dans certaines poutres, les transducteurs (émetteur et récepteur) sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. [19]

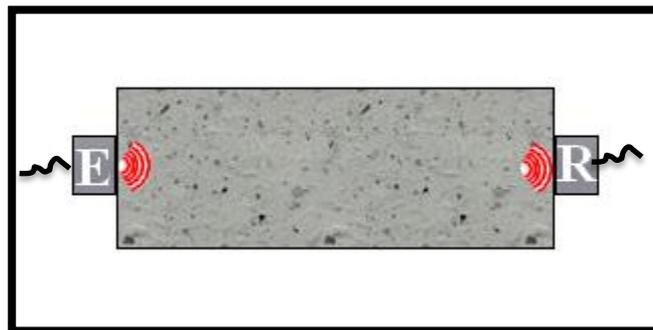


Figure III.1 : Mesures en transparence directe.

III.5.2.2 Mesures en surface :

Utilisées sur tous les éléments de structure et sur éprouvettes, plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

L'émetteur est maintenu en un point fixe ; le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant. Après avoir porté graphiquement les temps et les distances, on trace la droite moyenne de ces différents points dont la pente correspond à la valeur de la vitesse du son dans le milieu considéré. [19]

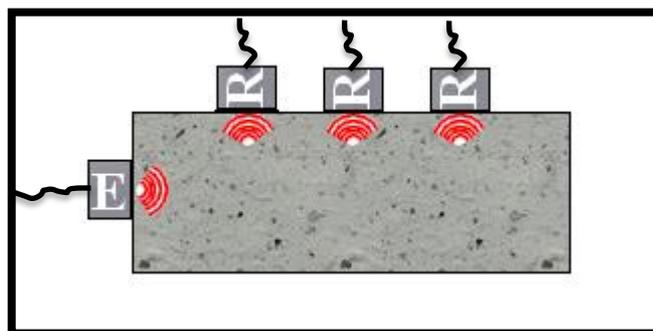


Figure III.2 : Mesures en surface.

III.5.2.3 Mesures en transparence par rayonnement :

Cette méthode consiste à placer l'émetteur en un point fixe, et sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne. [19]

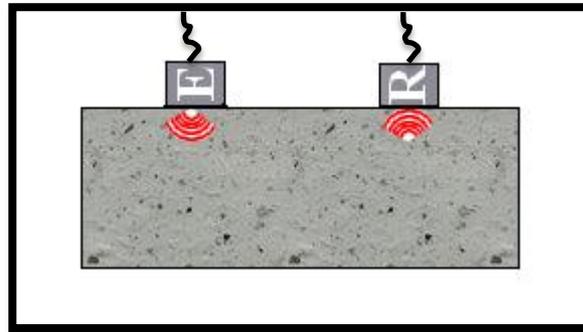


Figure III.3 : Mesures en transparence par rayonnement.

III.5.3 Mode opératoire en transparence directe :

Dans ce travail, nous avons effectué les mesures en transparence directe sur des éprouvettes (10*20) cm³ en béton, donc en va présenter le mode opératoire de cette technique de mesure directe.

III.5.3.1 Préparation de l'élément :

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire dit « couplant » entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé. [19]

III.5.3.2 Longueur minimal de parcours :

La distance minimale séparant les transducteurs doit être supérieure ou égale à quatre fois la dimension du plus gros granulats de béton. [25]

III.5.3.3 Points de mesures :

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, ...) les points de mesures sont situés aux intersections

d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m, le cas des petits éléments (poteaux, poutres...) les mesures se font en six points, (voir figures ci-dessous). [19] Chaque mesure doit être répétée trois fois repositionnant les transducteurs avec, si cela est possible. [25]

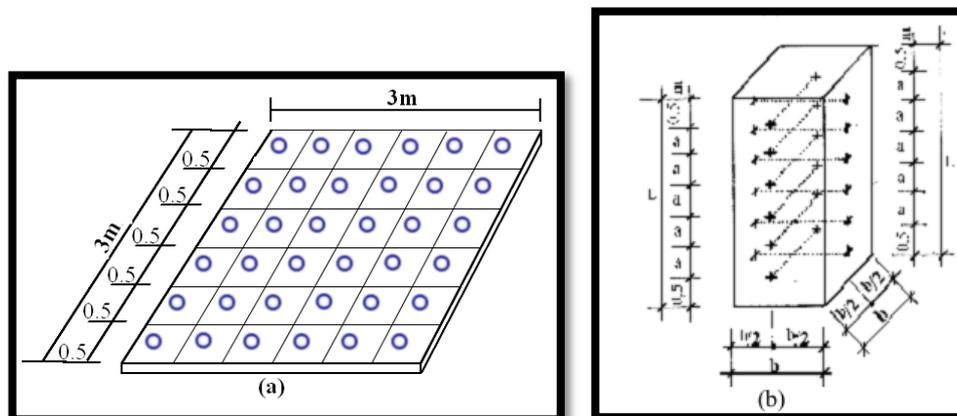


Figure III.4 : Points de mesures pour une dalle et un poteau. [25]

a : un panneau (exemple : une dalle de $3 \times 3 \text{ m}^2$)

b : un petit élément (exemple : en poteau de section $b \times b$ et de hauteur h)

III.5.3.4 Influence des armatures :

La vitesse de propagation mesurée sur du béton armé, à proximité des armatures, est souvent plus élevée que celle que l'on mesure dans un béton de masse de même composition.

En effet, la vitesse de propagation dans l'acier est de 1,2 à 1,9 fois celle que l'on mesure dans du béton non armé.

Dans certains cas, la première impulsion qui arrive au transducteur s'est propagée en partie dans l'acier et en partie dans le béton.

L'accroissement apparent de la vitesse de propagation dépend de la proximité des armatures par rapport à l'emplacement des points de mesure, de la section et de nombre des armatures, de leur positionnement par rapport au parcours et de la vitesse de cette impulsion dans le béton d'enrobage. [19]

III.5.3.5 Influence des conditions d'essai :**a. Etat de surface :**

Le point ou la zone d'application des transducteurs ne doit pas être dégradée. Un décapage préalable à sera éventuellement réalisé.

Dans le cas d'emploi de transducteurs plan, la surface de contact du béton doit être lisse. Un ponçage préalable à l'essai sera éventuellement réalisé. [25]

b. Humidité et température du béton :

Les comparaisons de valeurs obtenues ne peuvent se faire que dans des conditions d'humidité ou de température du béton très voisines.

On a pu constater des écarts de temps de propagation sur un même béton sec ou saturé. On peut être confronté à ce problème dans le cas notamment des mesures en surface. [25]

III.5.4 Interprétation des résultats mesurés :

Lorsque de grands écarts de vitesse de propagation sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré. Par ailleurs, une grande vitesse de propagation est synonyme de bonne compacité du béton. Le tableau (III.1) donne des informations sur la compacité en fonction de la vitesse de propagation. [20]

Tableau III.1: Appréciation de la compacité du béton. [20]

Compacité	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4000
Bonne	3200-4000
Douteuse	2500-3200
Mauvaise	1700-2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

Des études réalisées par le laboratoire RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Expert des Matériaux) ont montré que la corrélation avec la résistance à la compression a pour forme :

$$R_c = a \cdot e^{(b \cdot v)} \dots (III.2)$$

Avec **a** et **b** des coefficients dépendant de la nature des granulats utilisés et **V** la vitesse de propagation.

De même, deux relations ont été établies entre la vitesse de propagation et le module d'élasticité dynamique du béton :

$$E_d = \frac{(1+\nu).(1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \gamma \cdot V^2 \dots\dots(III.3)$$

V : Représente la vitesse des ondes (Km/s).

γ : La masse volumique du béton (kg/m^3).

ν : Coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0,15 pour un béton de haute résistance et de 0,3 pour un béton de faible résistance.

E_d : module d'élasticité dynamique (MPa).

En peut ensuite établir la relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression par la relation suivante [20, 25] :

$$R_c = 16,7e^{\left(\frac{E_d}{122500}\right)} \dots\dots(III.4)$$

III.5.5 Les avantages :

- ◆ Facilite la détermination de l'homogénéité et l'uniformité du béton.
- ◆ Donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton.
- ◆ Utilisé pour détecter la fissuration, les vides, les nids de caïeux et les détériorations dues au gel ou de feu.
- ◆ utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage.
- ◆ Utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel. [26]

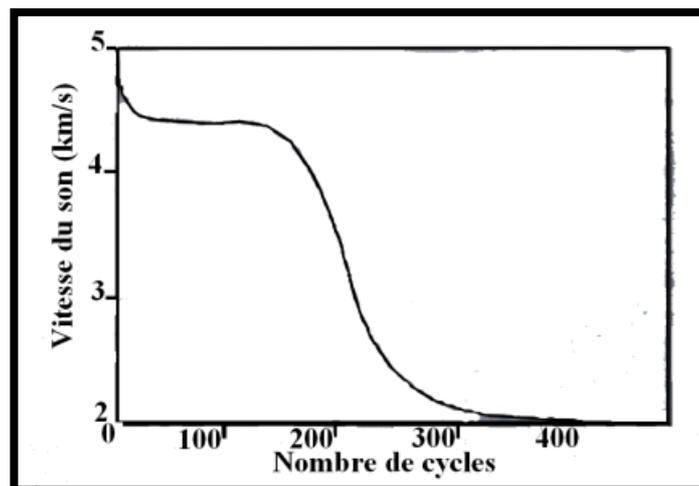


Figure III.5 : Détérioration d'un béton par des cycles gel-dégel. [16]

III.5.6 Les inconvénients :

- ◆ Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.
- ◆ La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage. [26]

III.6 Essai sclérométrique : (EN 12398)

Le scléromètre est un appareil relativement simple d'utilisation, il est destiné à mesurer, indirectement, la résistance à la compression du béton à partir de la mesure de sa dureté superficielle. Il existe une relation empirique de corrélation entre cette résistance et un indice dit "indice sclérométrique" et qui consiste à traduire la dureté du béton. [27]



Figure III.6 : Scléromètre digital.

III.6.1 Principe de l'essai :

La tige du scléromètre étant appuyée contre la surface à tester, le ressort est comprimé.

Quand la tige est complètement enfoncée dans le scléromètre, une masse se déclenche automatiquement, venant la frapper, et par là, la surface à tester. La tige réagit et retransmet à la masse le rebondissement. Le béton est d'autant dur et compact, que le rebondissement est important.

Sur un cadran gradué, un curseur lié à la masse (rebondie) indique le point maximal atteint.

On peut alors lire directement la valeur de l'indice sclérométrique.

Une fois l'indice reporté sur un abaque de transformation la valeur de la résistance à la compression est obtenue et ce, en tenant compte de l'inclinaison de l'appareil. [27,28]

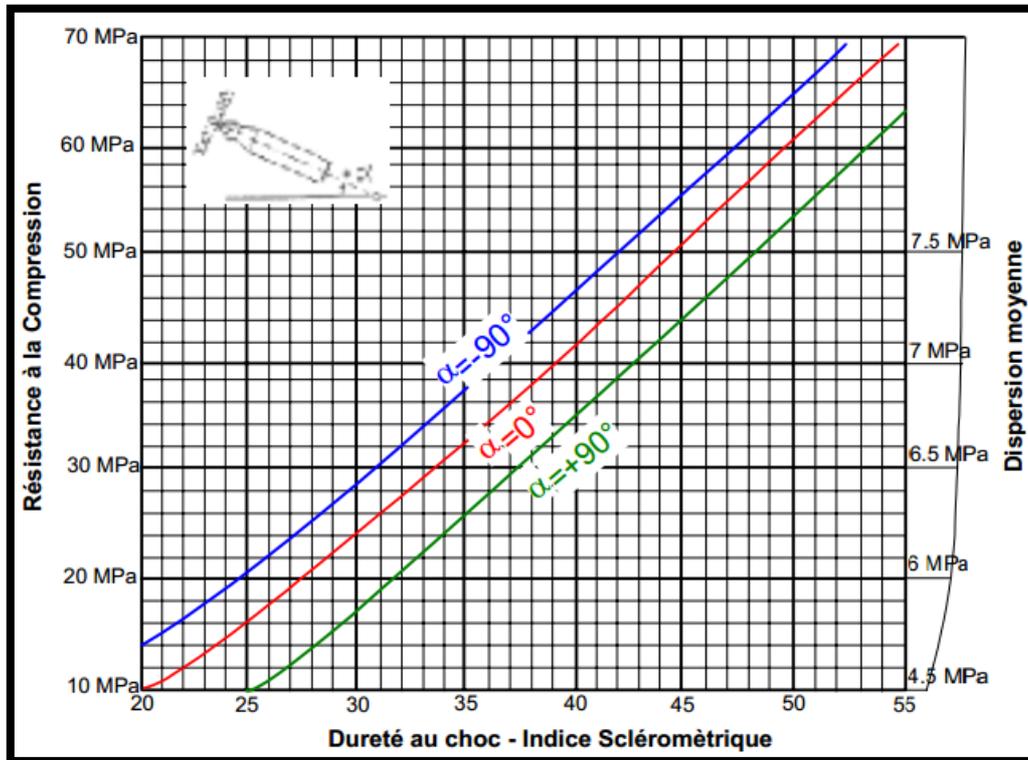


Figure III.7 : La résistance probable du béton en fonction de la mesure du recul (linéaire ou angulaire). [27]

III.6.2 Appareillage :

a. Scléromètre :

L'appareille est composé par les éléments suivants :

1. Élément vérificateur de contact ;
2. Surface à mesurer ;
3. Carcasse de l'appareil ;
4. Indicateur de la valeur de mesure ;
5. Echelle de mesure ;
6. Bouton ;
7. Baguette conductrice centrale ;
8. Flanc conducteur ;
9. Couvercle inférieur de la carcasse ;
10. Crochet ;
10. Couvercle supérieur de la carcasse ;
11. Carcasse du ressort ;
12. Suspension du ressort ;
13. Percuteur réel ;
14. Anneau amortisseur ;
15. Anneau percuteur léger ;
16. Emplacement de l'anneau tenseur ;
17. Anneau en feutre ;
18. Pivot ;
19. Erou ;
20. Taquet d'entraînement pour l'indicateur ;
21. Enclave du taquet d'entraînement ;
22. Suspension ;
24. Fixation de la suspension (coussin).

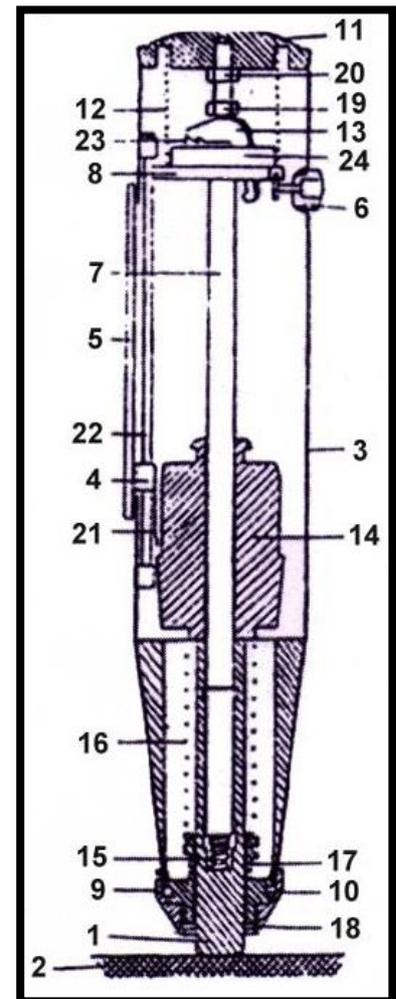


Figure III.8 : *Vu en coupe d'un scléromètre et ses composants.*

b. Pierre à polir :

Pierre à base de matière abrasive de texture à graine moyens telle que, par exemple, carbure de silicium aggloméré, son rôle est la préparation de la surface testée. [27,28]

III.6.3 Exécution des mesures :

La surface de l'ouvrage à tester est divisée en zones d'au moins 400 cm² chacune. Il est nécessaire de faire une série de 27 mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre deux mesures est de 3 cm au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de 3 cm des bords de la surface testée.

On fait ensuite la moyenne de ces 27 mesures. Les valeurs qui correspondent à des anomalies doivent être éliminées.

Cette moyenne, reportée sur l'abaque qui tient compte de la position de l'appareil, ou sur un tableau, donne les valeurs minimum et maximum de la résistance à la compression du béton.

III.6.3.1 Mesures sur éprouvettes :

Les éprouvettes doivent être de forme cylindrique de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm, ils doivent être maintenus entre les plateaux d'une presse hydraulique, sous une contrainte de 0,5 MPa.

Il est relevé 27 mesures réparties sur trois génératrices en 27 points distincts et distante entre eux de 30 mm, d'où aucune mesure ne doit être située à moins de 40 mm des faces planes de l'éprouvette.

Dans tous les cas de conservation, les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après un délai d'au moins 48 h, après leur sortie de l'ambiance de conservation. [27]

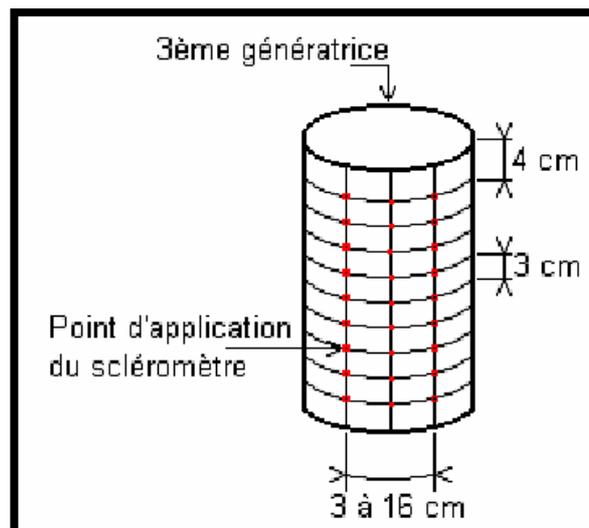


Figure III.9 : Mesure sur éprouvette cylindrique (16*32) cm³. [29]

III.6.3.2 Mesures sur ouvrage :

Tout surface rugueuse, poreuse, écaillée, humide ou zone de nid de Cailloux doivent être traité ou évité. [27,28]

III.6.4 Exploitation des résultats :

Des études ont montré que la formule en question peut prendre la forme :

$$R_c = a (I_s)^2 + b (I_s) + c \dots\dots(III.5)$$

Avec :

a,b et c : des coefficients dépendant de la nature des granulats,

Is : étant l'indice sclérométrique,

Rc : la résistance à la compression.

Pour des granulats siliceux de qualité courante ($D_{\max} = 16 \text{ mm}$) et pour un béton de résistance inférieure à 30MPa, on peut considérer d'après F.Gabryszak [18] que :

$$Rc = \frac{1}{37} \cdot (Is)^2 - 0.3(Is) \dots\dots(III.6)$$

III.6.5 Les avantages :

- ✓ C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide.
- ✓ Utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués.
- ✓ Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé). [26]

III.6.6 Les inconvénients :

- ✓ Une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies.
- ✓ La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Selon la norme BS 1881 : partie 202 : 1986, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm. Les changements qui n'affectent que la surface du béton, comme le degré de saturation en surface (qui abaisse l'indice de rebondissement) ou la carbonatation (qui augmente cet indice).
- ✓ Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats et le degré de carbonatation de la surface. [26]

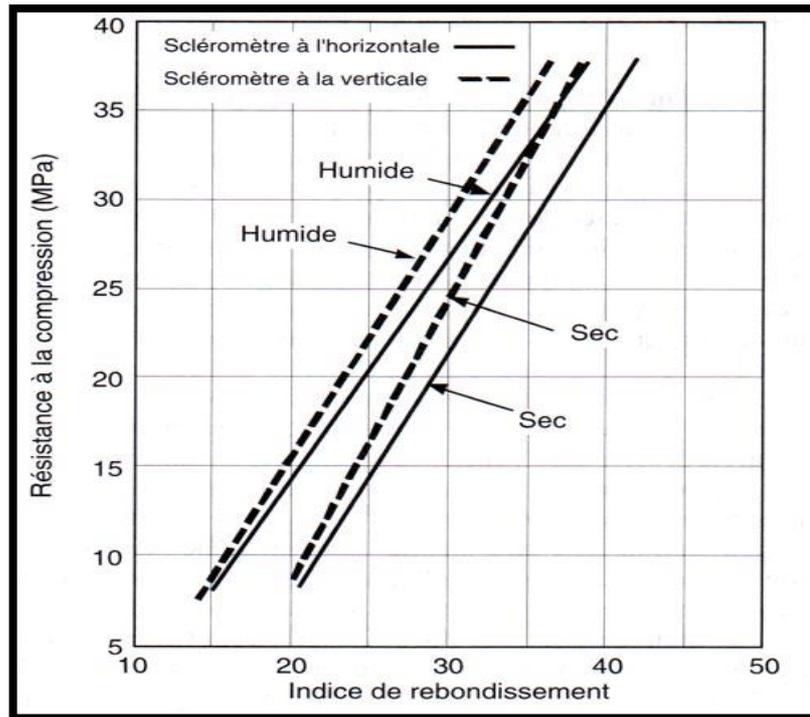


Figure III.10 : La relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. [29]

III.7 La méthode combinée :

Dans certains cas on combine les deux méthodes, essais sclérométrique et auscultation sonore, ce qui permet de déterminer l'établissement de la résistance mécanique de l'élément testé. [4]

Ces techniques ont été évoluées au cours des dernières années en particulier dans le cas de l'évaluation de la construction.

Toutes les méthodes disponibles pour l'évaluation du béton in-situ sont limitées, leur fiabilité est souvent mise en doute, et la combinaison de deux ou plusieurs des techniques est en train de devenir une solution à tous ces problèmes.

La combinaison de plusieurs techniques d'essais non destructifs est souvent mise en œuvre de manière empirique, en combinant deux techniques les plus souvent utilisées pour améliorer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression du béton; le principe est basé sur les corrélations entre les mesures observées et la propriété désirée.

La résistance à la compression du béton est généralement la propriété la plus prisée. Ceci a conduit au développement d'une méthode qui combine l'indice sclérométrique et la vitesse de propagation ultrasonore.

L'objectif de ces tests combinés est d'évaluer la résistance à la compression du béton coulé sur place, la meilleure approche est généralement de développer une relation de corrélation entre la vitesse d'ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à compression d'échantillon normalisée de laboratoire, dans certains cas les échantillon ne sont pas disponibles, alors un nombre de carottes doivent être prisés pour établir cette relation. La méthode normalisée combinée plus largement utilisée est la méthode mise au point par SonReb RILEM.

L'amélioration de la fiabilité des mesures s'explique par la prise en compte l'effet contradictoire des facteurs de variabilité de certaines propriétés de chacune des deux techniques (impulsion ultrasonique de la vitesse et le scléromètre). [17]

En a un exemple d'une formule combinée proposée par FERET qui associe le résultat de l'essai à l'ultrason et celui du scléromètre :

$$R_c = \left(\frac{I_s}{3,64 + 0,0235 * I_s - 0,56 * v} \right)^2 \dots\dots (III.7)$$

Avec :

I_s : l'indice sclérométrique.

V : la vitesse de propagation (mm/ μ s).

R_c : la résistance à la compression du béton (bars).

On constate donc que cette méthode fait intervenir les résultats de deux méthodes différentes. En revanche, elle ne peut être appliquée que si l'indice sclérométrique est sensiblement précis. [20,27]

Ces méthodes sont particulièrement avantageuses lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires.

Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux d'humidité elle provoque une augmentation de la vitesse de son, mais diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre Bellander (1977) montré sur la figure (III.11).

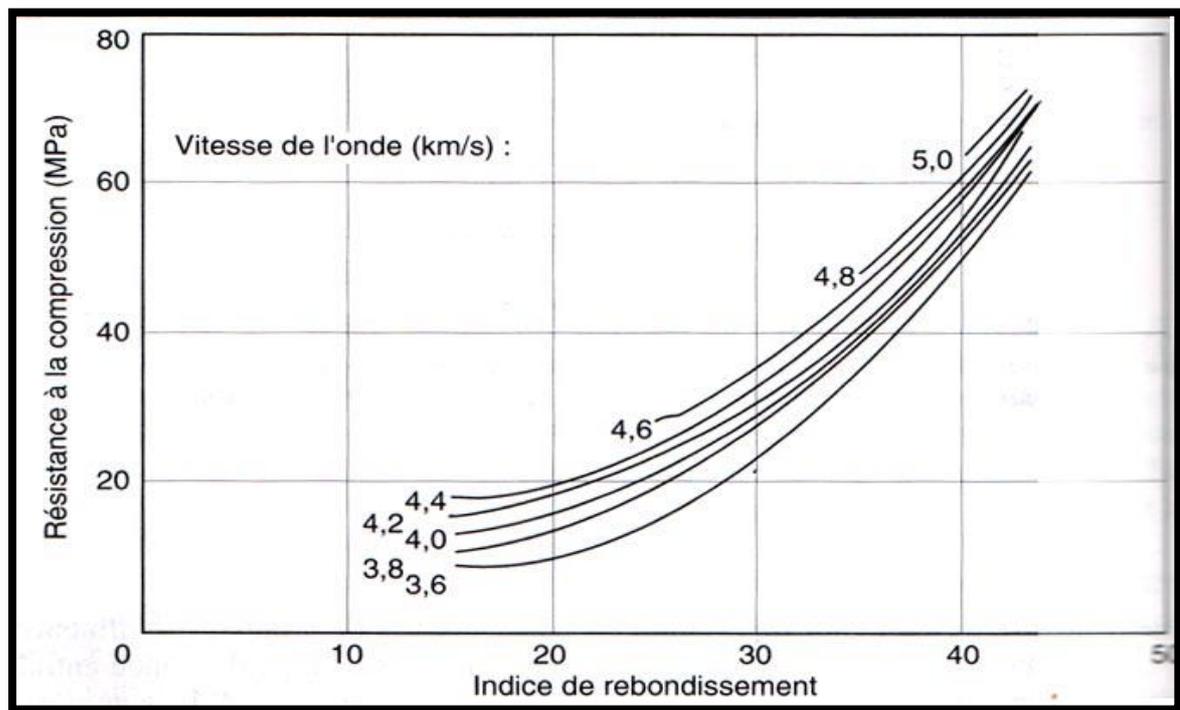


Figure (III.11): Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques et l'indice sclérométrique selon U.Bellander (1977).

[29]

III.7.1 Les avantages :

✓ L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites. Par exemple lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires.

✓ Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

✓ Évaluer la qualité du béton in situ, avec un minimum de connaissance antérieure au sujet du béton examiné. [26]

III.7.2 Les inconvénients :

✓ La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. La propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton.

✓ Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes. [26]

III.8 Quelques recherches et corrélation existantes :

Les essais non destructifs ont une très grande importance à nos jours, grâce à leur facilité, rapidité et l'aspect économique, pour ses raisons, ils font un domaine de recherche très vaste et très intéressant, on peut citer par exemple :

✓ Les travaux de Mr. KHEDER (1998) qui a trouvé des corrélations entre la vitesse de propagation des ondes ultrason, l'indice sclérométrique et la résistance à la compression.

✓ BOUDINA.R et LOURADIA (2012) ont pu proposer un modèle de corrélation entre les essais non destructifs et les essais d'écrasement d'un béton fabriqué dans les conditions locales.

✓ Ms. HANNACHI.S et al (2012) à travers leur travail sur les applications des méthodes d'évaluation de la qualité du béton in-situ.

Les différentes corrélations citées et autres modèles proposés sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Estimation de la contrainte de compression par quelques équations de corrélation.

Equation	R ²	Méthode utilisé	Références
$R_c = 1.1843I_S - 9.5105$	0.4976	Scléromètre	BOUDINA.R et LOURADIA (2012) [26]
$R_c = 31.289V - 110.28$	0.0950	Ultrason	
$R_c = 7.401(I_S/V) - 25.467$	0.7230	Scléromètre & Ultrason	
$R_c = 54.6389 - 0.7708I_S$	0.3983	Scléromètre	HANNACHI.S et al (2012) [30]
$R_c = 97.5409 - 0.0162V$	0.5213	Ultrason	
$R_c = 121.2976 - 0.0261I_S + 0.5452V$	0.5452	Scléromètre & Ultrason	
$R_c = 0.4030 * I_S^{1.2083}$	-	Scléromètre	Les travaux de Mr. KHEDER (1998) [30,31]
$R_c = 1.2 * 10^{-5} * V^{1.7447}$	0.4100	Ultrason	
$R_c = 0.0158 * V^{0.4254} * I_S^{1.1171}$	-	Scléromètre & Ultrason	
$R_c = 1.146e^{(0.77V)}$	0.8000	Ultrason	Turgut (2004) [31]
$R_c = 1.19e^{(0.715V)}$	0.5900	Ultrason	Nashn't et al. (2005) [31]

III.9 Caractérisation des propriétés du béton par l'essais d'ultrasons :

III.9.1 Estimation de la porosité, la perméabilité et la densité :

La détérioration du béton est généralement cause par la pénétration des agents agressifs à l'intérieure. La cinétique de la réaction du béton avec ces agents, donc sa durabilité est dépend des propriétés de transfère de son peau des premiers centimètres sous la surface.

L'essai ultrason est utilisé comme moyen non destructif d'estimation de pénétration des ions nuisible, trois degré de saturation est considéré :

- « Full saturation » **FS**: l'échantillon est saturé à 85%.
- « Partial saturation » **PS**: l'échantillon est saturé entre 45% et 55%.
- « Dry » **D** : le taux de saturation est inférieur à 10%.

La variation de la vitesse d'ultrason est manifeste comme montré la figure (III.12). [31]

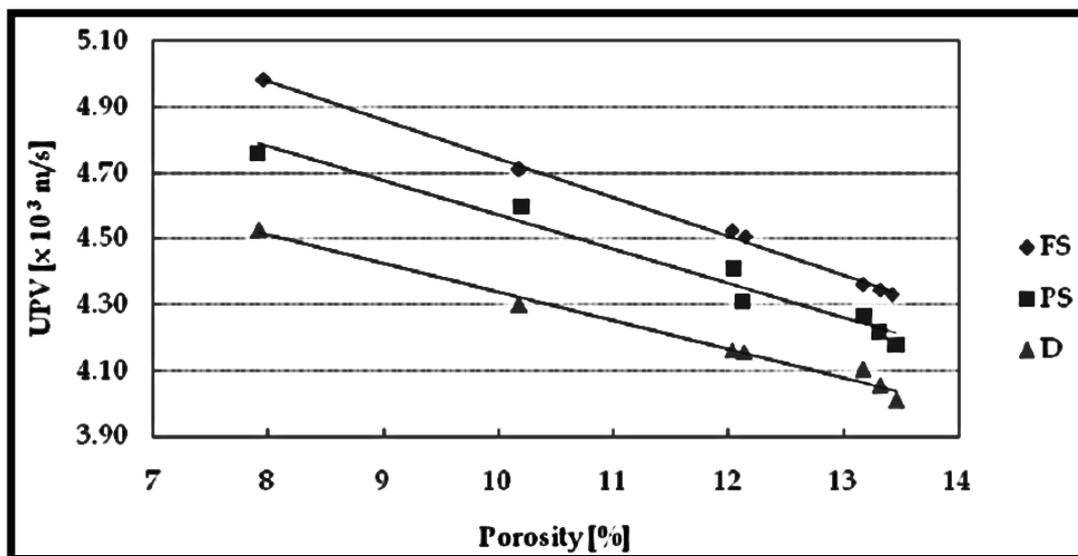


Figure III.12: Variation vitesse d'ultrason en fonction de la porosité. [31]

La vitesse de propagation des ondes sonores est diminuée avec l'augmentation de la porosité et la perméabilité, et augmente avec l'augmentation du taux de saturation.

Panzera et al (2008) a établi une corrélation qui lie la vitesse d'ultrason avec la densité du béton, plus le béton est dense plus la vitesse de propagation d'ultrason est grande.

La figure (III.13) présente la variation de la vitesse de propagation d'ultrason en fonction de la densité du béton. [31]

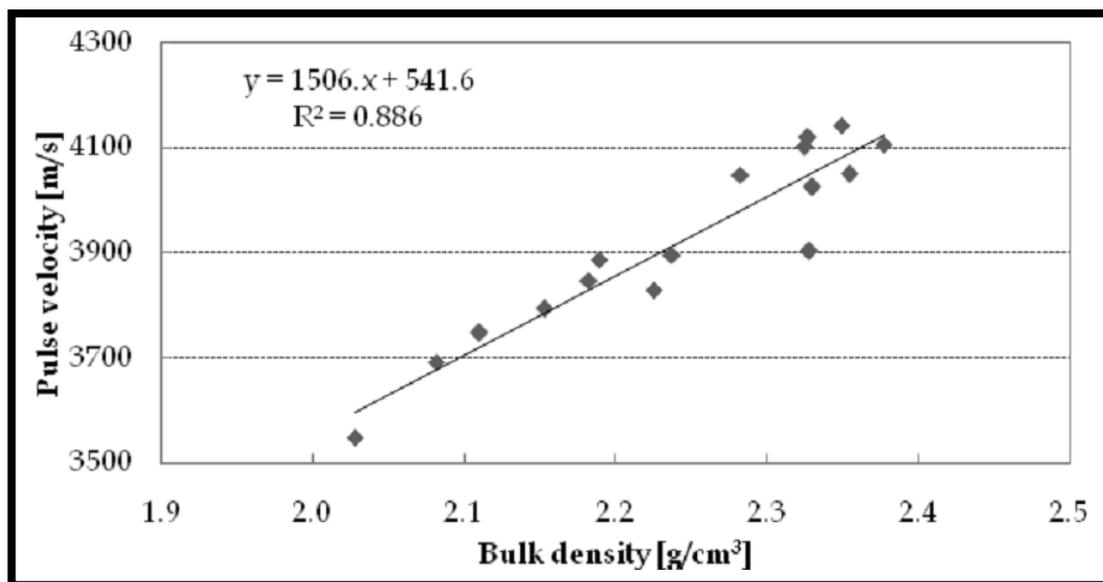


Figure III.13 : Corrélation entre la densité et la vitesse d'ultrason. [31]

La figure (III.14) présente la relation entre vitesse de propagation d'ultrason et les module d'élasticité statique (E_s) et dynamique (E_d), ces résultats indique que les valeurs du module d'élasticité dynamique est approximativement supérieure de 30 % à celui statique obtenu à partir de l'essai de compression. L'explication de cette variation est que l'essai ultrasonique est effectué à une contrainte très faible. Néanmoins, les deux modules présentent un sens d'évolution semblable. [31]

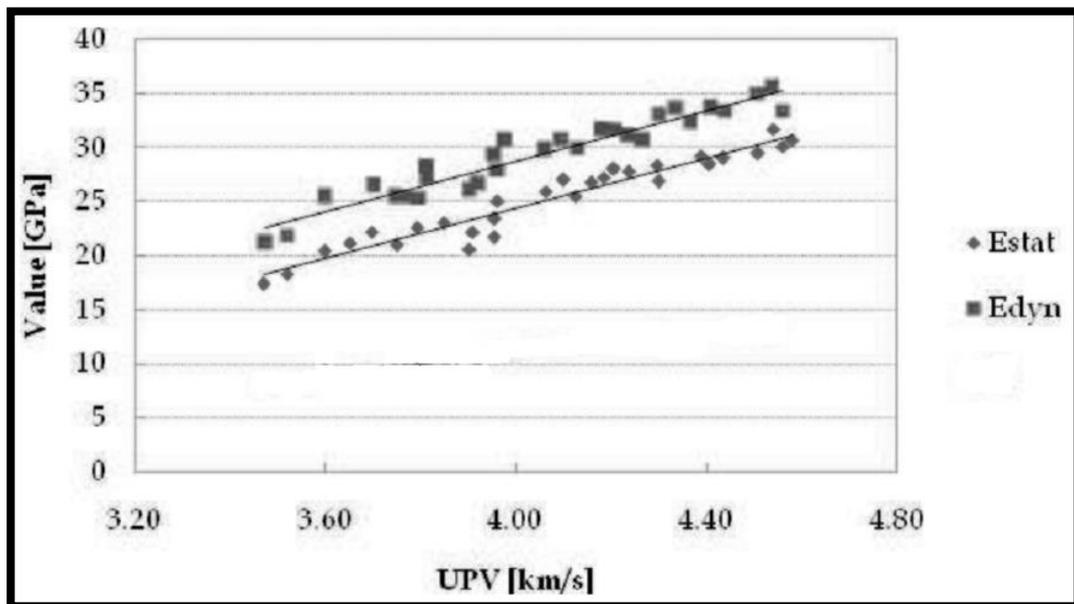


Figure III.14 : La relation entre vitesse de propagation d'ultrason et les modules d'élasticité statique (E_s) et dynamique (E_d). [31]

Chapitre IV :
Matériaux matériels
et
essais

IV. 1 Introduction :

Dans toute étude sur les bétons ou autres matériaux, la présentation et la caractérisation des différents matériaux et matériels utilisés est une tâche indispensable pour que le travail soit valable, strict et dans les normes.

Dans ce chapitre, on va présenter les différents matériaux (gravier, sable et ciment) utilisés dans cette étude, afin de déterminer les caractéristiques nécessaires qui nous permettront de procéder aux formulations de béton (caractéristiques physiques et mécaniques) et on décrira les calculs de formulation des bétons étudiés, ensuite on va décrire aussi les différents essais destructifs et non destructifs avec leurs procédures et normes.

IV. 2 Matériaux utilisés:

Nous avons utilisé les matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamed El Bachir El Ibrahimy Bordj Bou Arréridj complétées par quelques essais au laboratoire de génie civil à l'université de M'SILA.

IV. 3 Caractéristiques des matériaux:**IV. 3. 1 Caractéristiques du gravier :**

Le gravier utilisé pour la confection du béton est un gravier de la carrière de MECHRI obtenue après concassage de la roche. Les fractions utilisées sont : (3/8), (8/15) et (15/25).

IV. 3. 1. 1. Analyse granulométrique du gravier concassé : EN 933-5**◆ But de l'essai**

L'analyse granulométrique d'un échantillon a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages des différents grains constituant l'échantillon testé.

◆ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

♦ Critères que doit l'échantillon comblé :

La quantité utiliser doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée répond au critère suivant :

$$M \geq 0,2 D_{\max}$$

D_{\max} : Diamètre maximal du gros granulat en (mm).

M : La masse de l'échantillon en (kg). [15]

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.1 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Moyen (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisa cumulé (%)
(3/8) 1600g	8	103	116.67	116.67	7.29	92.71
		114				
		133				
	6.3	645	679.34	796.01	49.75	50.25
		712				
		681				
	5	507	473.34	1269.35	79.34	20.66
		447				
		466				
	4	286	272.67	1542.02	96.38	3.62
		265				
		267				
	3.15	55	53.00	1595.02	99.67	0.33
		55				
		49				
	2.5	03	2.67	1597.69	99.85	0.15
		03				
		02				
Fond	01	0.34	1598.03	99.88	0.12	
	00					
	00					

Tableau IV.2 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Moyen (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulés (%)	Tamisa cumulé (%)
(8/15) 3200g	16	48	62	62	1.94	98.06
		53				
		85				
	12.5	480	520.67	582.67	18.21	81.79
		552				
		530				
	10	907	940.34	1523.01	47.59	52.41
		958				
		956				
	8	1076	1053.34	2576.35	80.51	19.49
		1080				
		1004				
	6.3	561	510.34	3086.69	96.46	3.54
		461				
		509				
	5	85	78.67	3165.36	98.92	1.08
		72				
		79				
	Fond	42	33.34	3198.7	99.96	0.04
		25				
		33				

Tableau IV.3: L'analyse granulométrique de gravier concassé (15/25).

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Moyen (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulés (%)	Tamisa cumulé (%)
(15/25) 5000g	25	00	3.33	3.33	0.07	99.93
		10				
		00				
	20	929	831	834.33	16.69	83.31
		822				
		742				
	16	2873	2900.67	3735	47.59	52.41
		2805				
		3024				
	12.5	1097	1151.33	4886.33	74.70	25.30
		1235				
		1123				
	10	71	73	4959.33	96.46	3.54
		73				
		75				
	8	10	11.33	4970.66	99.19	0.81
		09				
		15				
	Fond	30	28.33	4998.99	99.98	0.02
		28				
		27				

Les courbes granulométriques de différentes fractions granulaires utilisés sont tracés ci-dessous, ainsi que la courbe du mélange.

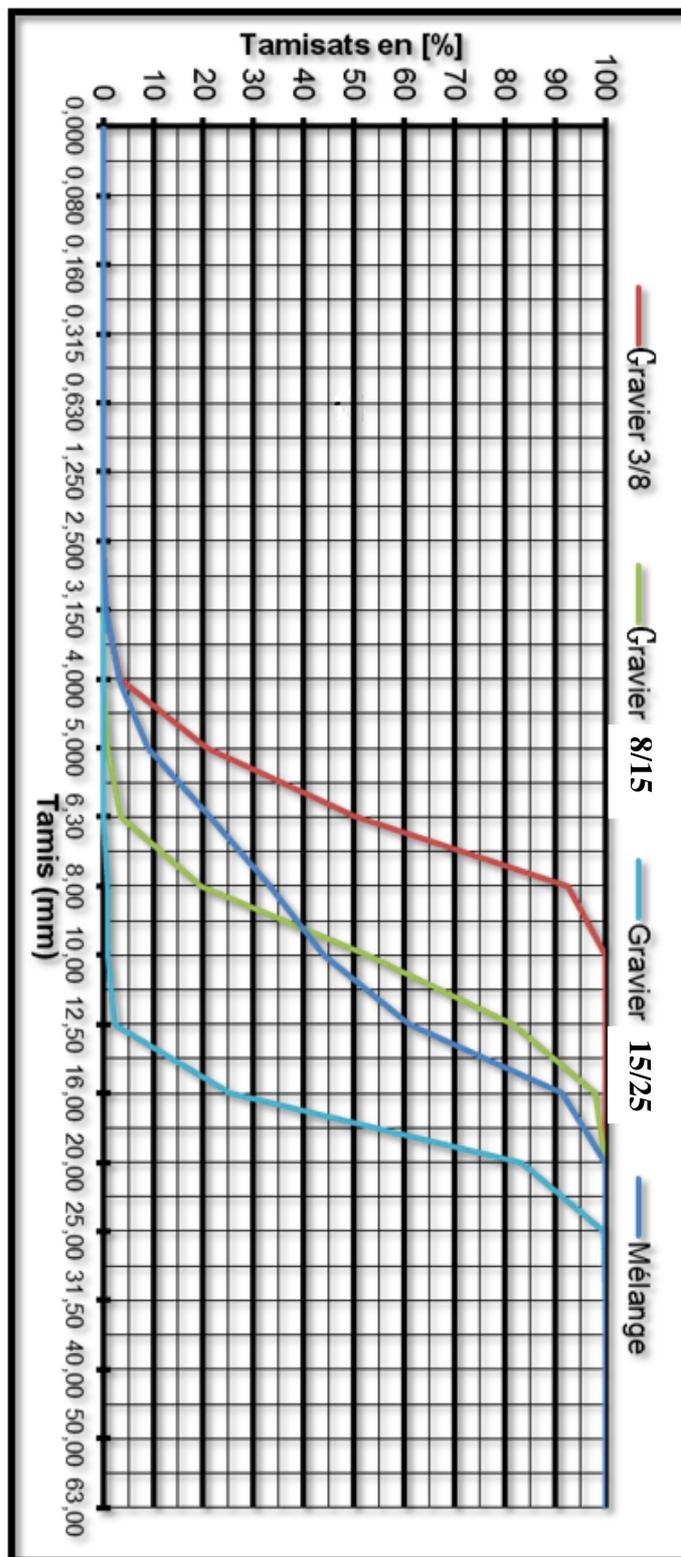


Figure IV.1: Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/15), (15/25) ainsi leur mélange.

VI. 3. 1. 2 Masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

a. La masse volumique apparente (γ):

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide du corps et les vides contenus dans les grains (volume apparent).

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ):

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu ou volume réel).

Les masses volumiques s'expriment en fonction des unités courantes des masses et des volumes :

$$\text{t/m}^3, \text{kg/dm}^3, \text{g/cm}^3.$$

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité :

Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité.

VI. 3. 1. 2. 1 La masse volumique apparente (γ): EN 1097-6**◆ Principe :**

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

◆ Mode opératoire :

- ✓ Peser le récipient à vide et noter M_1 ,
- ✓ Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- ✓ Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
- ✓ Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,

- ✓ Araser à la règle,
- ✓ Peser le contenu et noter M_2 .
- ✓ L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.

Il résulte que :

$$\gamma = (M_2 - M_1)/V \dots\dots(IV.1)$$

M_1 : masse du récipient vide.

M_2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient. [32]

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.4 : La masse volumique apparente (γ) du gravier concassé
[(3/8), (8/15) et (15/25)].

Gravier	M_2 (kg)	M_1 (kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(3/8)	7.416	0.841	5	1.315	1.338
	7.595			1.351	
	7.580			1.348	
(8/15)	7.983			1.428	1.419
	7.958			1.423	
	7.882			1.408	
(15/25)	7.943			1.420	1.437
	8.153			1.462	
	7.985			1.429	

VI. 3. 1. 2. 2 La masse volumique absolue ou spécifique (ρ): EN 1097-6

◆ Principe :

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau, sauf pour les corps réagissant avec l'eau qui conduisent à utiliser un autre liquide (Benzène en principe).

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

◆ **Mode opératoire :**

- ◆ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (400 ml),
- ✓ Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Bien éliminer les bulles d'air,
- ✓ Lire le nouveau volume V_2 ,
- ✓ Le volume absolu ou réel est : $V = V_2 - V_1$ (IV.2)
- ✓ La masse volumique réelle est : [32] $\rho = M / (V_2 - V_1)$ (IV.3)

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.5 : La masse volumique absolue (ρ) du gravier concassé [(3/8), (8/15) et (15/25)].

Gravier	M (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ (kg/l)	$\rho_{\text{ moy}}$ (kg/l)
(3/8)	300	400	516	2.586	2.593
			515	2.608	
			516	2.586	
(8/15)			517	2.564	2.564
			518	2.542	
			516	2.586	
(15/25)			515	2.608	2.586
			516	2.586	
			517	2.564	

VI. 3. 1. 3 La porosité : EN 1097-6

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P (\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \text{(IV.4)}$$

En peut exploiter les résultats des masses volumiques pour déterminer la porosité de notre gravier d'où :

$$P (\%) = \left(1 - \frac{\gamma}{\rho} \right) \times 100 \text{(IV.5)}$$

VI. 3. 1. 4 La compacité : EN 1097-6

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle exprime en pourcentage (%) et donner par la relation suivante :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100 \quad \dots\dots(IV.6)$$

Aussi :

$$C(\%) = 1 - P \quad \dots\dots(IV.7)$$

VI. 3. 1. 5 L'indice des vides : EN 1097-6

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s} \quad \dots\dots(IV.8)$$

Aussi :

$$e(\%) = \frac{1-C}{C} \quad \dots\dots(IV.9)$$

Les grandeurs de la porosité, la compacité et l'indice des vides des granulats sont rapportés sur le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	Indice des vides e (%)
(3/8)	48.39	51.61	0.937
(8/15)	44.65	55.35	0.806
(15/25)	44.43	55.57	0.799

VI. 3. 1. 6 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : EN 1097- 2

◆ **But de l'essai :**

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats. [33]

◆ **Principe de l'essai :**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, en évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm. [33]

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50).

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après [33]:

Tableau IV .7 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie. [33]

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 – 10	9	3960	à
10 – 14	11	4840	-150
10 – 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	à
25 – 50	12	5280	-150



Figure IV .2 : Appareille de Los Angeles.



Figure IV .3 : L'échantillon et les boules avant l'essai.

◆ Mode opératoire :

- ✓ Après introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- ✓ Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr/min à 33 tr/min.
- ✓ Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- ✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.
- ✓ Laver le refus au tamis de 1.6 mm. Égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- ✓ Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée avec :

$$P = 5000 - \text{refus} \dots\dots(\text{IV.10})$$

Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation suivante :

$$L_A = 100 (P/5000) \dots\dots(\text{IV.11})$$

P : est le passant à 1.6mm.

Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :

Tableau IV.8 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A . [33]

Coefficient L_A (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.9 : Résultats d'essai de Los Angeles du gravier [(3/8), (8/15) et (15/25)].

Fraction granulaire	L_A (%)
(3/8)	21
(8/15)	20.74
(15/25)	21

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dure et reconnue apte pour la confection du béton.

VI. 3. 1. 7 Degré d'absorption d'eau : EN 1097-6

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A (\%) = [(M_H - M_S)/M_S].100 \dots\dots(\text{IV.12})$$

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S : La masse du matériau sec en (g). [33]

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV .9 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (3/8), (8/15) et (15/25).

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
(3/8)	1000	978	2.25
(8/15)	1000	986	1.42
(15/25)	1000	990	1.01

VI. 3. 2 Caractéristique du sable :

Nous avons utilisé dans ce projet de fin d'étude un sable local de dune d'origine siliceux vient de BOUSAADA exactement d'OUED MAITHER d'où ses caractéristiques sont les suivant :

VI. 3. 2. 1 Analyse granulométrique : EN 933-1

◆ But de l'essai :

Permettre la détermination des grosseurs ainsi les pourcentages respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

◆ Principe de l'essai :

Faire passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissante de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

◆ Mode opératoire :

Le mode opératoire est identique à celui cité précédemment dans la partie des graviers, la seule différence est la durée de l'essai qu'elle été 3minutes dans le cas des sables.

En prépare 03 échantillons de sable de dune de 2kg de masse, et en répète l'essai 03 fois et en prendre la moyenne.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de BOUSAADA sont regroupés dans le tableau (10) ci-dessous :

Tableau IV .10 : Analyse granulométrique du sable de dune BOUSAADA.

Tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	8.33	8.33	0.42	99.58
2,50	115	123.33	6.16	93.84
1,25	83	206.33	10.31	89.69
0,63	113.33	319.66	15.97	84.03
0,315	1007	1326.66	66.28	33.72
0,16	590.67	1917.33	95.79	4.21
0,08	75.67	1993	99.57	0.43
Fond	8.67	2001.67	100	0.00

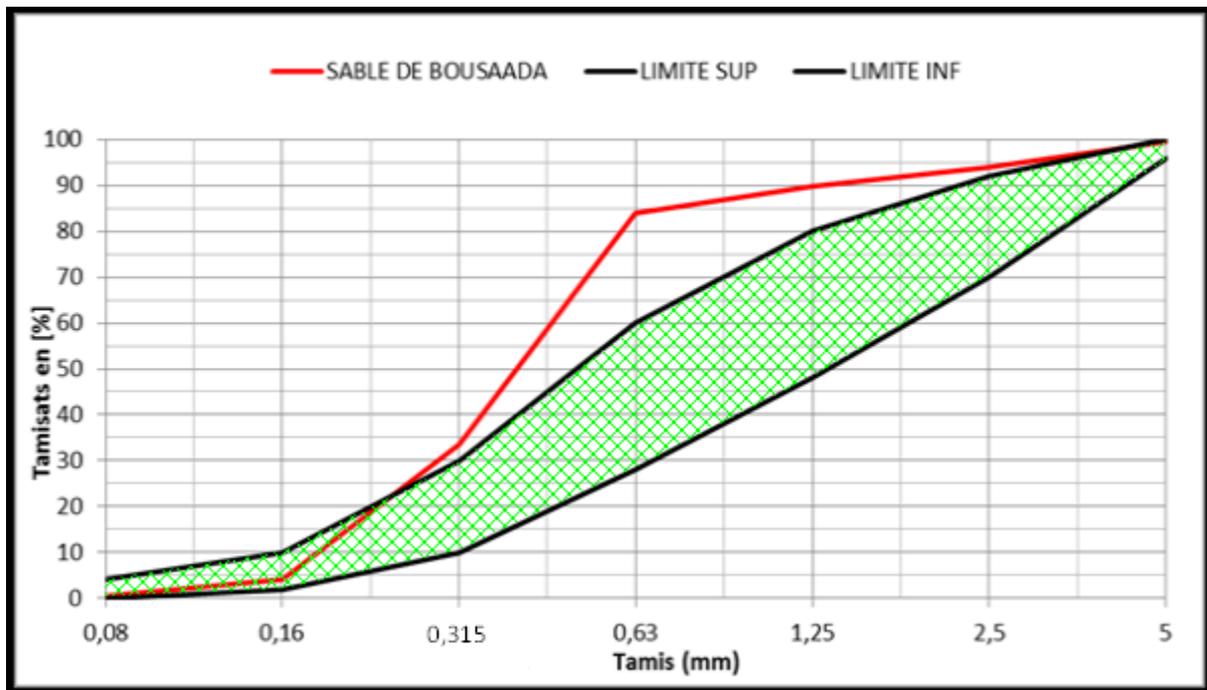


Figure IV.4 : Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA).

En observe qu'une grande partie de la courbe granulométrique est située à l'extérieure du fuseau recommandé, ce qui nous informe que le sable testé est un sable fin, en peut confirmer notre jugement par le calcul du module de finesse du sable.

VI. 3. 2. 2 Module de finesse : EN 12620

Le module de finesse est égal au $1/100^{\circ}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm. [17]

$$Mf = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis}\{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, en trouve que la norme Française donne la classification suivante :

Tableau IV.11: Classification des sables en fonction du module de finesse. [34]

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

En a obtenue pour notre sable testé un module de finesse **Mf=1.94**, ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable.

Le sable testé est un **sable fin** : $1.5 < Mf < 2$ Convient à un béton de moindre résistance mais facile de mettre en place.

VI. 3. 2. 3 Propreté « équivalent de sable » : EN 933-8

◆ **But de l'essai :**

L'essai permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm.

Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

◆ **Mode opératoire :**

- ✓ Remplir l'éprouvette d'une solution la vente jusqu'au premier repère.
- ✓ A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de libéré les bulles d'air et favorise le mouillage de l'échantillon.
- ✓ Laisser reposer pondant 10 min.
- ✓ Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontal en 30s à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
- ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vente au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- ✓ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- ✓ Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- ✓ Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\% \dots\dots(IV.13)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

- ✓ Introduire el piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h'_2/h_1) 100\% \dots\dots(IV.14)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.

♦ **Interprétation des résultats :****Tableau IV .12 :** *Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable* *E_{SV} et E_{SP} . [34]*

E_{SV}	E_{SP}	Nature et qualité de sable
$E_s < 65$	$E_s < 60$	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
$65 < E_s < 75$	$65 < E_s < 80$	Sable légèrement argileux : de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq E_s \leq 85$	$70 \leq E_s \leq 80$	Sable propre : à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
$E_s \geq 85$	$E_s > 85$	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

En a répété l'essai 03 fois, les résultats sont regroupés dans le tableau (13) ci-dessous :

Tableau IV.13 : *Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.*

Hauteur (cm)	h_1	h_2	E_{SV} (%)	E_{SVmoy} (%)	h'_2	E_{SP} (%)	E_{SPmoy} (%)
Echantillon (1)	13.90	8.20	58.99	64.27	8.00	57.55	59.07
Echantillon (2)	12.50	8.3	66.40		7.40	59.20	
Echantillon (3)	12.90	8.7	67.44		7.80	60.46	

Le sable testé donne les résultats suivants :

$E_{SV} = 64.27$ (%) }
 $E_{SP} = 59.07$ (%) } Le sable est considéré argileux et nécessite un lavage avant sont utilisation.

VI. 3. 2.4 Caractéristiques physiques du sable :

Il est nécessaire de déterminer tous les caractéristiques physiques pour le sable de dune . Pour cela, une série des essais a été effectuée afin de bien caractérisé notre sable.

VI. 3. 2. 4. 1 Masse volumique apparent : EN 1097-6

a. Masse volumique à l'état compacte :

C'est la masse du matériau par unité de volume après remplissage du récipient et le compacter par tassement à 30 secousses manuelles, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M_2 la masse de l'ensemble (sable +récipient) M_1 la masse de le récipient.

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\gamma_c = (M_2 - M_1) / V_r \dots\dots (IV.15)$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1 \ell$). [33]

b. Masse volumique à l'état lâche :

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé et un récipient de capacité 1 ℓ .

On remplit l'entonnoir avec du sable sec.

On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.

On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\gamma_L = (M_2 - M_1) / V_r \dots\dots (IV.16)$$

M_1 : Masse du récipient vide

M_2 : Masse du récipient plus le sable

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1\ell$). [33]

c. La porosité :

$$P(\%) = [1 - (\gamma/\rho)] \times 100\% \dots\dots(IV.17)$$

a) à l'état lâche :

$$P_L(\%) = [1 - (\gamma_L/\rho_s) \times 100\% \dots\dots(IV.18)$$

b) à l'état compact:

$$P_c(\%) = [1 - (\gamma_c/\rho_s) \times 100\% \dots\dots(IV.19)$$

d. La compacité :

$$C(\%) = 1 - P \dots\dots(IV.20)$$

a) à l'état lâche :

$$C_L(\%) = 1 - P_L \dots\dots(IV.21)$$

b) à l'état compacte:

$$C_c(\%) = 1 - P_c \dots\dots(IV.22)$$

e. L'indice des vides:

$$e(\%) = p / (1 - p) \dots\dots(IV.23)$$

a) à l'état lâche :

$$e_L(\%) = P_L / (1 - P_L) \dots\dots(IV.24)$$

b) à l'état compacte:

$$e_c(\%) = P_c / (1 - P_c) \dots\dots(IV.25)$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau (14) ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Les commentaires concernant les propriétés physiques, mentionnés dans le tableau, sont tirés d'après une étude de caractérisation du sable, les rapports et projets de recherches réalisées au sein du département de génie civil, université d'ELBACHIR ELEBRAHIMI Bordj Bou Arreridj.

Tableau IV.14: Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).

Propriété	Valeurs	Commentaire
Provenance	OUED MAITHER (BOUSAADA)	Ce site se trouve dans un lieu accessible pour tous les utilisateurs.
Classe	0/5	Le sable est tamisé in situ.
Nature minéralogique	Siliceux	La silice représente plus de 90% d'après l'analyse chimique.
Masse volumique apparente	1,558	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Masse volumique absolue	2,514	Un sable performance pour l'utilisation ordinaire.
Masse volumique à l'état lâche	1,558	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Masse volumique à l'état compacte	1,574	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Compacité à l'état lâche	61,98%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Compacité à l'état compacte	62,61%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Porosité à l'état lâche	38,02%	Le sable est peu poreux.
Porosité à l'état compacte	37,39%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Indice des vides à l'état lâche	33,65%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Indice des vides à l'état compact	59,72%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Degré d'absorption	17,65%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.

VI. 3. 3 Caractéristiques du ciment utilisé :**VI. 3. 3. 1 Présentation du ciment MATINE :**

C'est un ciment CEM II/B 42.5 N, provient de la cimenterie de HAMMAM DALAA Wilaya de M'SILA. Il gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide.

On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300° et 1500°C°.

En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés (C-S-H).

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1.

VI. 3. 3. 2 Domaines d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- ◆ Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- ◆ Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport, etc.) ;
- ◆ Secteur hydraulique (barrages, château d'eau, stations d'épuration, etc.) ;
- ◆ Secteur industriel.

VI. 3. 3. 3 Analyses et caractérisation :

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment MATINE obtenu par le fournisseur.

Tableau IV.15 : Analyse chimiques du ciment MATINE.

Composantes	Valeur (%)	Norme
Teneur en sulfates SO ₃	2.00 à 2.70	NA 5042
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.00 à 2.20	
Teneur en chlorures	0.01 à 0.05	
Teneur en équivalent en alcalis	0.3 à 0.75	
Perte au feu	7.50 à 12.00	
Résidus insolubles	0.7 à 2.00	

Tableau IV.16 : Composition minéralogique du clinker.

Composantes	Valeur (%)
Silicates tricalciques C3S	58 à 64
Silicates bicalciques C2S	12 à 18
Aluminates tricalciques C3A	6.00 à 8.00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF	10.00 à 12.00

Tableau IV.17 : Propriétés physiques du ciment utilisé.

Propriété	Valeur
Consistance normale	25 à 28.50 (%)
Surface spécifique Blaine	4150 à 5250 (cm ² /g)
Retrait à 28 jours	<1000 (µm/m)
Expansion	0.3 à 2.5 (mm)
Masse volumique apparente	1.005 (kg/dm ³)
Masse volumique spécifique	3.02 (kg/dm ³)

Tableau IV.18 : Temps de prise à 20°C.

Temps de prise	Temps (min)	Norme
Début de prise	140 à 195	NA 230
Fin de prise	195 à 290	

Tableau IV.19 : Résistance mécanique à la compression.

Age de l'éprouvette	Résistance à la compression (MPa)	Norme
02 jours	≥ 10.0	NA 234
28 jours	≥ 42.5	

VI. 3. 4 L'eau de gâchage : EN 1008

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimique sont les suivants :

Tableau IV.20 : Analyse chimique de l'eau utilisé pour le gâchage.

Paramètre	Quantité	Commentaire
pH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Taux de (Cl ⁻)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO ₂ ⁻)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO ₃ ⁻)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Résidu sec	100 mg/l	Traces non nuisible.

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université de El Bachir EL Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

Les résultats obtenus à montrer que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

IV. 4 Composition du béton :**◆ But :**

Déterminer les proportions de ciment, d'eau, de granulats et sable éventuels devant entrer dans la composition d'un béton dont on exige certaines performances.

IV.4.1 Méthode de SCRAMTAIEV :

La somme de tous les matériaux composants pour un dosage de 1m³ de béton frais est à 1000 litres.

Pour confectionner un béton, il faut connaître les méthodes de calcul en vigueur (calcul des dépenses en matières premières) et leur mis en œuvre.

On choisit alors les composants du béton d'une façon convenable dans des proportions bien définies.

Les données de base servant pour le calcul de la composition du béton sont :

- ◆ La classe de résistance requise du béton (R_b).
- ◆ Le degré de fluidité ou de consistance du béton.
- ◆ Les caractéristiques des matériaux d'origine :
 1. Activité du ciment (R_C).
 2. Masse spécifique (absolus) du ciment.
 3. Masse spécifique (absolus) et masses volumiques (apparentes) du sable, ou gravier.
 4. La porosité des pierres concassées ou du gravier.

La composition du béton c.à.d. la dépense (quantité) de ciment, eau, de sable et de pierres concassées ou de gravier est établie approximativement par calcul, en suite elle est précisée par la méthode d'essai de dosages expérimentaux de mélange de béton.

Les principes étapes de calcul de la composition du béton sont :

1. On définit le rapport (C/E) qui assure l'obtention d'un béton de résistance requise.
2. On détermine la dépense en eau (E).
3. On fait le calcul de la quantité de ciment (C), ensuite des pierres concassées (PC) ou gravier (G) et de sable(S).

IV.4.2 Présentation de la méthode :

a. Définition du rapport (ciment /eau) :

Le professeur SCRAMTAIEV a établi les relations suivantes, qui donnent la valeur de la résistance du béton (R_b) en fonction du rapport C/E et des qualités du liant et des granulats.

a) Pour un béton P et TP : $C/E \leq 2.5$ on a : $R_b = A \cdot R_c [(C/E) - 0.5]$
 $\Rightarrow C/E = R_b / (A \cdot R_c) + 0.5 \dots\dots (IV.26)$

b) Pour un béton F et TF: $C/E > 2.5$ on a : $R_b = A' \cdot R_c [(C/E) + 0.5]$
 $\Rightarrow C/E = R_b / (A' \cdot R_c) - 0.5 \dots\dots (IV.27)$

Avec :

R_b : Classe de béton.

R_c : Activité du ciment.

A, A' : Coefficients admis d'après le tableau (IV.21) selon les propriétés et la qualité des matériaux utilisés.

C/E : Rapport du poids de ciment au poids de l'eau dans l'unité de volume du mélange.

Tableau IV.21 : Valeurs des coefficients A et A' .

Granulats et liants	A	A'
De qualité supérieure	0.65	0.43
De qualité ordinaire	0.60	0.40
De qualité inférieure	0.55	0.37

La formule (a) correspond aux bétons ordinaires plastiques.

La formule (b) correspond aux bétons plutôt secs de haute résistance mécanique.

b. Détermination de la dépense en eau :

Elle est établie approximativement d'après le tableau (IV.22), qui tient compte de la qualité des matériaux utilisés :

Tableau IV.22 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.

La quantité d'eau l/m ³ en fonction du diamètre du plus gros grain d'agrégat				Propriétés des bétons frais	
70	40	20	10	Maniabilité (sec)	Affaissement (cm)
115	120	130	145	200-150	0
120	125	135	150	120-90	0
125	130	145	160	80-60	0
130	135	150	165	50-30	0
140	145	160	175	30-15	0
145	155	170	185	-	2-1
160	165	180	195	-	4-3
165	170	185	200	-	6-5
170	175	190	205	-	8-7
175	185	200	215	-	10-9

c. Détermination de la dépense en ciment :

$$C = [(C/E) \cdot E] \dots \dots (IV.27)$$

d. Détermination de la dépense en gravier :

La détermination du dosage en agrégats doit remplir les deux conditions suivantes :

- 1- La somme des volumes absolue de tous les composants du béton est égale à 1 m³ du mélange de béton damé.
- 2- La porosité des agrégats dois égale à zéro.

$$(C/ \rho_c) + (E/ \rho_e) + (S/ \rho_s) + (G/ \rho_g) = 1000 \dots \dots (IV.28)$$

Ou:

C, E, S et G : dépenses en ciment, eau, sable et pierres concassées (gravies) en (Kg/m³).
 ρ_c , ρ_e , ρ_s et ρ_g : masse spécifiques ou masses volumique absolues de granulats avec un certain écartement des grains:

$$(C/ \rho_c) + (E/ \rho_e) + E = [(P_g \times \alpha \times G/ \gamma_g)] \dots \dots (IV.29)$$

Avec:

P_g : porosité des pierres concassées.

γ_g : masse volumique ou masse volumique apparente des pierres concassées en (Kg/l).

α : coefficient d'écartement des grains des pierres concassées, donné par le tableau (IV.23).

Tableau IV.23 : Valeurs du coefficient « α » en fonction du E/C et dosage en ciment.

Dosage en ciment (Kg/m ³)	E/C = 0.40	E/C = 0.50	E/C = 0.60	E/C = 0.70	E/C = 0.80
250	-	-	1.26	1.32	1.38
300	-	1.30	1.36	1.42	-
350	1.32	1.38	1.44	-	-
400	1.40	1.46	-	-	-

En résolvant simultanément les deux équations (IV.27) et (IV.28), on trouve l'expression qui permet de déterminer la qualité nécessaire de pierres concassées :

$$G=1000/ [V_{pc} * (\alpha/ \gamma_{vol.oc}) + (1/ \rho_{pc})].....(IV.30)$$

Avec :

$$V_{pc} = (1-(Y/\rho)).....(IV.31)$$

e. Détermination de la dépense en sable :

Après avoir déterminé la dépense en pierres concassées, on fait le calcul de la dépense en sable (Kg/m³).

$$S= [1000 - [(C/\rho_c) + E+ (PC/\rho_{pc})]] \cdot \rho_s.....(IV.32) [10]$$

IV.4.3 Calcule de la composition du béton :

En a choisie pour notre étude la confection de 05 classes de béton, varié de 20, 25, 30, 35 et 40 MPa, notre objectif dernier cette variété des gammes de béton est de rencontré les classes possibles de béton existés dans les ouvrages réalisés réellement.

En va utiliser dans les 05 premières classes du béton une granularité discontinue, par contre, en va procéder pour les autres une granularité continue et voir l'influence de la granularité sur les résultats d'auscultation.

En va présenter en détail la formulation 1m^3 de béton de classe 20 MPa, et les autres classe en va les regroupés dans un tableau global.

a. Définition du rapport C/E :

$$\left. \begin{array}{l} R_c = 425 \text{ bars.} \\ R_b = 200 \text{ bars.} \\ A = 0,60 \end{array} \right\} C/E = 200 / (0,60 \times 425) + 0,5 \Rightarrow C/E = 1,28$$

b. Détermination de la dépense en eau :

Pour $D < 40\text{mm}$: en fait l'interpolation et il nous résulte que :

D'après le tableau : **E=181,25l**

- ◆ CPJ plus de (10 à 15) l
- ◆ Sable fine (+10) l
- ◆ Gravier concassé (+10) l

Donc : **E=206,25l**

c. Détermination de la dépense en ciment : E/C=0,78

$$C = [(C/E) \cdot E] = 1,28 \times 206,25 = 264 \text{ Kg/m}^3$$

$$C = 264 \text{ Kg/m}^3$$

d. Détermination de la dépense en gravier :

✓ **Pierres concassées (gravier) :**

$$D_{\max} = 25\text{mm}$$

$$\gamma_{pc} = 1,437 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{pc} = 2,586 \text{ g/cm}^3$$

$$G = 1000 / [V_{pc} (\alpha / \gamma_{vol.oc}) + (1 / \rho_{pc})]$$

V= porosité =P

$$P = (1 - (\gamma_{pc} / \rho_{pc}))$$

$$P = (1 - (1,42 / 2,56)) = 0,45$$

α : coefficient d'écartement entre le gravies

$$\alpha = 1,37$$

$$G = 1000 / [0,445 * (1,37 / 1,44) + (1 / 2,586)]$$

$$G=1236\text{Kg/m}^3$$

e. Détermination de la dépense en sable :

✓ **Sable de dune :**

$$\gamma_s = 1,558 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = 2,514 \text{ g/cm}^3$$

✓ **Ciment:**

$$\rho_c = 3,02 \text{ g/cm}^3$$

$$S = [1000 - (C/\rho_c) + E + (G/\rho_g)] \cdot \rho_s$$

$$S = [1000 - (264/3,02) + (206,25/1) + (1236/2,586)] \cdot 2,514$$

$$S=574\text{Kg/m}^3$$

IV.4.4 Volume du gâché pour 1m^3 pour les bétons à granularité discontinue:

Tableau IV.24 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité discontinue pour 1m^3 .

Matériaux Classe	Ciment (kg/m ³)	L'eau (l/m ³)	Gravier (kg/m ³)		Sable (kg/m ³)
			G (8/15)	G (15/25)	
C _{d20}	264,00	206,25	494,40	741,60	574,00
C _{d25}	305,25	206,25	487,00	730,40	557,87
C _{d30}	346,50	206,25	481,60	722,40	536,60
C _{d35}	385,68	206,25	478,00	717,00	513,00
C _{d40}	427,00	206,25	481,60	722,40	470,00

IV.4.5 Volume du gâché pour 12 éprouvettes cylindriques (10X20) cm³:

- ♦ Pour une éprouvette :

$$V = \pi \times R^2 \times H = 3,14 \times 5^2 \times 20 = 1570,80 \text{ cm}^3 = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

- ♦ Pour 12 éprouvettes :

$$V = 1,57 \cdot 10^{-3} \times 12 = 1,884 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

En a effectué une majoration en volume de 20% sur les dépenses des différents constituants, les résultats sont regroupés dans le tableau (IV.25) suivant :

Tableau IV.25 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité discontinue pour 12 éprouvettes (10*20) cm³.

Matériaux Classe	Ciment (kg)	L'eau (l)	Gravier (kg)		Sable (kg)
			G (8/15)	G (15/25)	
C _{d20}	5,964	4,656	11,174	16,761	12,972
C _{d25}	6,901	4,656	11,006	16,509	12,612
C _{d30}	7,824	4,656	10,886	16,330	12,120
C _{d35}	8,712	4,656	10,804	16,207	11,597
C _{d40}	9,648	4,656	10,886	16,329	10,620

Pour les bétons à granularité discontinue, les pourcentages des fractions granulaires (8/15) et (15/25) sont 40% et 60% respectivement conformément aux travaux réalisés précédemment, et pour le plaisir de continuer et confirmer le travail de nos camarades.

IV.4.6 Volume du gâché pour 1m³ pour les bétons à granularité continue:

Pour les bétons à granularité continue les résultats sont regroupés dans le tableau (26), les pourcentages des différents fractions de gravier (3/8), (8/15) et (15/25) sont calculer par la méthode de Dreux-Gorisse, le processus de détermination est schématisé dans la courbe suivante :

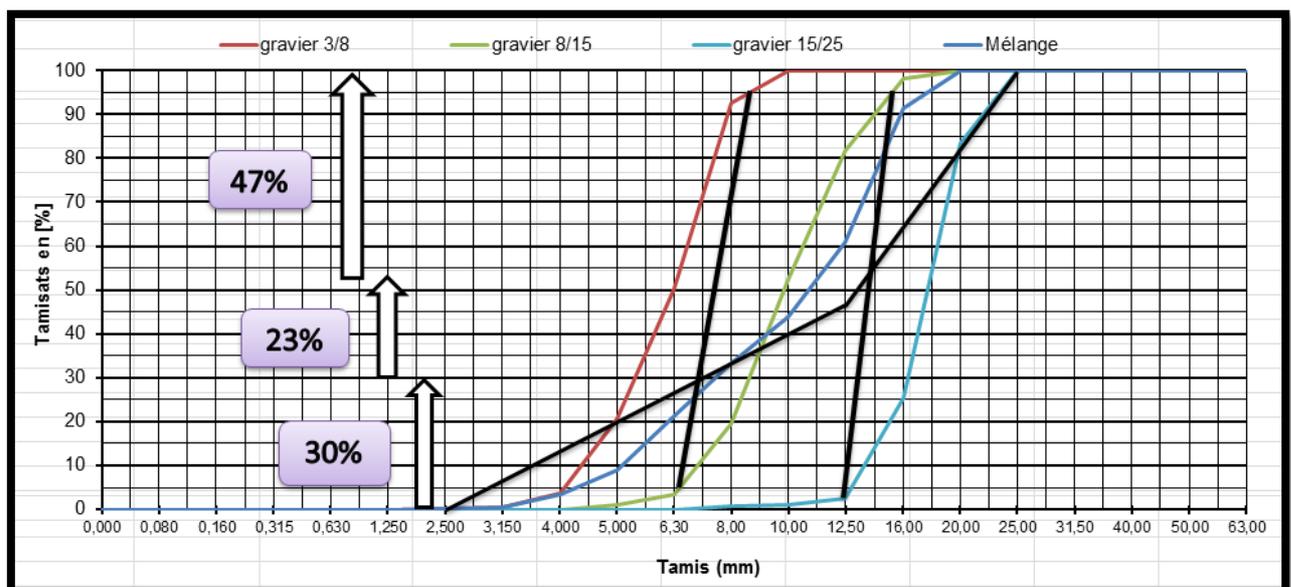


Figure IV.5: Pourcentage de différentes fractions granulaires (3/8), (8/15) et (15/25) par la méthode de Dreux-Gorisse.

Tableau IV.26 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité continue pour 1m^3 .

Matériaux Classe	Ciment (kg/m^3)	L'eau (l/m^3)	Gravier (kg/m^3)			Sable (kg/m^3)
			G (3/8)	G (8/15)	G (15/25)	
C _{c20}	264,00	206,25	370,80	284,28	580,92	574,00
C _{c25}	305,25	206,25	365,10	279,91	571,99	557,87
C _{c30}	346,50	206,25	361,20	276,92	565,88	536,60
C _{c35}	385,68	206,25	358,50	274,85	561,65	513,00
C _{c40}	427,00	206,25	361,20	276,92	565,88	470,00

Tableau IV.27 : Dépense en matériaux des différentes classes de béton à granularité continue pour 12 éprouvettes ($10*20$) cm^3 .

Matériaux Classe	Ciment (kg)	L'eau (l)	Gravier (kg)			Sable (kg)
			G (3/8)	G (8/15)	G (15/25)	
C _{c20}	5,964	4,656	8,380	6,425	13,129	12,972
C _{c25}	6,901	4,656	8,254	6,328	12,932	12,612
C _{c30}	7,824	4,656	8,165	6,260	12,791	12,120
C _{c35}	8,712	4,656	8,104	6,213	12,700	11,597
C _{c40}	9,648	4,656	8,165	6,260	12,791	10,620

IV.5 Matériels et essais:**IV.5.1 Essais sur béton à l'état frais :**

Après avoir calculé théoriquement les compositions des différentes classes du béton, en va passer à la confection des éprouvettes de chaque classe et les effectuer les essais nécessaire commencent par celle à l'état frais.

a. Malaxage : EN 12390-2

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- ✓ Gros éléments,
- ✓ Liant,
- ✓ Sable,
- ✓ Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min,
- ✓ Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2 min,
- ✓ Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré.

b. Affaissement au cône d'Abrams (slump test) : EN 12350-2

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm, il réalise à l'ordre suivant :

- ✓ Introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches d'égales.
- ✓ Piquer chaque couche 25 coups avec une tige de $\Phi = 16\text{mm}$.
- ✓ Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur de moule.
- ✓ Démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre



Figure IV.6 : *Mesure de l'affaissement.*

c. Teneur en air : EN 12350-7**◆ But de l'essai :**

Il s'agit de mesurer la teneur en air occlus du béton frais c-à-d. pour connaître la contenance en air d'un béton quelconque ,on se sert de l'aéromètre à béton.

◆ Principe :

L'aéromètre travaille selon le principe de la loi de **BOYLE - MARIOTTE**. La mesure du pourcentage d'air occlus d'un béton frais est basée sur le fait que seul l'air occlus est compressible.

◆ Mode opératoire :

- ✓ Pesé la cuve vide par la balance et noté M_1 .
- ✓ Introduire le béton dans la cuve .
- ✓ Placer la cuve sur la table vibrante et vibrer pendant 15 secondes en complétant la quantité de béton .
- ✓ Araser la surface supérieure à l'aide d'une règle biseautée, avec un mouvement de sciage .
- ✓ Nettoyer les bords de la cuve.
- ✓ pesé la cuve plein par la balance et noté M_2 pour calculer la masse volumique apparente.
- ✓ Mettre le chapeau sur la cuve, et serrer à l'aide des crochés.
- ✓ Régler l'aiguille à 100%.
- ✓ Vider l'air occlue jusqu'au niveau rouge.
- ✓ Régler l'aiguille à 0% à l'aide du bouton noir.
- ✓ Appliqué une pression à l'aide du bouton ver jusqu'à la stabilisation de l'aiguille.



Figure IV.7 : Aéromètre à béton de 8 litres.

Après finir le mode opératoire, lire le pourcentage de l'air occlue sur la graduation.

d. Vibration : EN 12390-2

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- ✓ Remplir les moules cylindriques $10 \times 20 \text{ cm}^3$.
- ✓ On fait la vibration sur la table vibrante pendant 15s.
- ✓ Peser les moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.
- ✓ Procéder à l'arasement.

Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24h puis décoffrées et marquées par marqueur et conservées dans l'eau. [4]

IV.5.2 Essais sur béton à l'état durci :

Le béton est considéré comme un solide monolithique après achèvement de la prise c'est un matériau en perpétuelle évolution ceci pour plusieurs raisons parmi lesquelles :

- ◆ La poursuite des réactions d'hydratation du ciment pendant plusieurs années notamment, la cohésion et les dimensions du matériau.
- ◆ Les variations du milieu ambiant engendrent des changements lents dans la structure du béton durci.

a. Durcissement du béton :

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement à l'hydratation progressive du ciment.

Il est bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le béton passe ceci peut être expliqué par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décroît elle-même avec le temps.

b. Mode de conservation de béton : EN 12390-2

Le degré d'humidité du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton.

Les éprouvettes cylindriques sont conservées dans l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$. [35]

c. Résistance à la compression (essai d'écrasement): EN 12390-4

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton.

La détermination de cette résistance est nécessaire pour contrôler cette qualité essentielle de notre du béton.

Presse hydraulique :

La presse utilisée répond aux normes EN 12390-4, elle comporte deux parties :

- ✓ Unité de commande constituée de :
 - ◆ Un cadran pour valeur maximal de charge ;
 - ◆ Interrupteur principal ;
 - ◆ Commande de réglage de la vitesse ;
 - ◆ Clapet de charge-décharge.

- ✓ Unité de pression : où on met l'éprouvette d'essai.



Figure IV.8 : Presse hydraulique capacité 3000 KN.

d. Description générale de l'essai : EN 12390-4

L'essai lui-même doit être conduit rigoureusement pour obtenir de bons résultats. On observera en particulier :

- ◆ Un bon centrage de l'éprouvette.
- ◆ Une vitesse de chargement donnée.
- ◆ On met la presse en marche de nouveau avec la même vitesse (0.5 KN/s) jusqu'à la rupture, on décharge et on note la charge de rupture **F** et la résistance **R_c**.

On calcule la résistance avec cette formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \dots\dots (IV.33)$$

R_c : résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm^2).

IV.5.2.1 Essais non destructive :

a. Essais d'auscultation sonore : EN 12504-4

◆ Principe:

Il s'agit d'évaluer la résistance du béton à partir de la vitesse de propagation d'ondes. Il est en effet reconnu et prouvé qu'il existe un rapport étroit entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à l'intérieur de matériaux homogènes, et la qualité de ceux-ci .

La vitesse est le quotient entre la distance séparant les transducteurs émetteur et récepteur par le temps de propagation de l'onde.



Figure IV .9 : Essai d'ultrasons et ses équipements.

En a effectuer les mesures sur les éprouvettes après les faire sortir du bac de conservation et laisser sécher pendant 24h. Les éprouvettes cylindriques sont préparées pour effectuer des essais d'auscultation dynamique. Cette préparation consiste à faire certaines opérations préliminaires à savoir la calibration de l'appareil et marquer les points d'essais sur les éprouvettes afin de centrer les ondes dans la structure béton. Sur chaque éprouvette cylindrique nous avons effectué 4 mesures, de manière à appliquer les deux sondes et les fixés longitudinalement à l'aide des tiges de fixation pour limité les erreurs de mesure le plus que

possible. Le temps "t" du parcours est lu directement sur un écran digital au moment de leur stabilisation.



Figure III.10 : Marquage des points des mesures sur éprouvette.

b. Essais de dureté par rebondissement scléromètre: EN 12504-2

◆ Description de l'essai :

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours. Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la "dureté au choc" du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique).

Cet indice, reporté sur abaque, permet de déduire la résistance à la compression du béton testé.

On place l'éprouvettes entre les plateaux de la presse on applique la vitesse constante (0,5MPa/s) jusqu'à ce que la charge atteinte $10 \approx 20$ KN, puis on fait l'essai sclérométrique horizontal 10 coups en avant.



Figure IV.11: Scléromètre digital.



Figure IV.12 : Exécution de l'essai sclérométrique.

IV.6 Mesure le taux d'absorption d'eau: EN 1097

a. Objet :

La présente norme a pour objet d'exposer la technique de la mesure du coefficient d'absorption d'eau des agrégats.

b. Méthode d'essai

b.1 Préparation des éprouvettes :

Dans notre travail nous avons utilisés l'éprouvette coupée en trois coups.



Figure IV.13 : Préparation des éprouvettes.

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105°C jusqu'à masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesées effectuées à une heure d'intervalle est au plus égale à 1/1000 (Généralement, il suffit de 15heures à l'étuve pour éteindre cette masse).

Par la suite la précision admise sur les pesées est de 1/1000.

b.2- Mode opératoire :

On note la masse M_1 (en gramme) de chaque éprouvette sèche.

Au temps t , on place les éprouvettes dans l'eau potable jusqu'au quart de leur hauteur de façon que l'eau remonte perpendiculairement au lit de carrière.

À $[t+1 \text{ heures}]$, on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour que le niveau atteigne la moitié de la hauteur des éprouvettes.

À $[t+22\text{heures}]$ on ajoute de l'eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient complètement immergées.

À $[t+48\text{heures}]$, les éprouvettes sont sorties de l'eau, rapidement essuyées à l'aide d'un chiffon ou d'une peau de chamois humide, puis pesées, soit M_2 la masse (en grammes) de chaque éprouvette saturée d'eau à la pression atmosphérique.

b.4- Expression des résultats :

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est $M_2 - M_1$.

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A_{bs} = (M_2 - M_1) / M_1 \dots\dots(IV.34)$$

A_{bs} : taux d'absorption.

M_1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M_2 : masse d'éprouvette saturée d'eau.

IV.7 Méthodologie adapté pour la manipulation :

L'objectif principal de notre projet de fin d'étude et de pouvoir caractériser physiquement et mécaniquement les bétons fabriquer selon les conditions locales aux moyennes des essais non destructifs.

Pour cela, on va confectionner cinq classes de béton allons de 20, 25, 30, 35 et 40 MPa afin de traiter le maximum des situations possible sur terrain, un deuxième paramètre est mis en jeu parallèlement avec la classe du béton c'est la granularité, d'où en va formuler 60 éprouvettes de type cylindrique (10*20) cm³ à base de granularité discontinue d'où les fractions granulaire mis employer sont (8/15) et (15/25) et autre 60 éprouvettes sont formuler avec du granularité continue (3/8), (8/15) et (15/25).

Après le malaxage, une mesure de l'affaissement et du teneur en air sont obligatoire pour déterminer quelques caractéristiques du béton à l'état frais.

Des mesures sont effectuées sur les éprouvettes à 7, 14 et 28 jours après durcissement aux moyennes des essais d'ultrason, scléromètre et finalement par l'écrasement.

Une éprouvette de chaque type de béton est destinée pour réaliser l'essai d'absorption à 28 jours.

Chapitre V :
Résultats
et
discussion.

V.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats obtenus par les essais de compression et les essais non destructifs (ultrasons, scléromètre), afin de pouvoir caractériser notre béton confectionné à base des matériaux locaux et déterminer ses propriétés physiques et mécaniques.

Dans l'analyse de ces résultats, on va baser sur l'étude statistique pour trouver des corrélations entre l'essai d'écrasement et les essais non destructifs (ultrasons, scléromètre).

V.2 Etude statistique:

La résistance d'une éprouvette de béton est définie à partir de la charge F_r conduisant à sa rupture. En raison de la dispersion des résultats et l'hétérogénéité du matériau du béton ; il est nécessaire lors de la fabrication de réaliser des essais de contrôle.

La moyenne \bar{x} de cette série est donnée par :

$$\bar{X} = \frac{\sum n_i * x_i}{\sum n_i} \dots\dots(V.1)$$

Une idée est de pouvoir mesurer la dispersion des résultats autour de la moyenne, la variance est la moyenne de carrée des écarts à la moyenne est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{\sum n_i * (x_i - \bar{X})^2}{\sum n_i} \dots\dots(V.2)$$

La variance pose un problème d'origine physique, elle n'est pas homogène en dimension à la quantité mesurée. La résolution de ce problème et l'introduction de la racine carrée de la variance qui va nous donner l'écart type comme suit :

$$\sigma = \sqrt{V} \dots\dots(V.3)$$

Le coefficient de variation exprimé en (%) de la moyenne renseigne sur la qualité de dispersion, donnée pour le béton par l'expression suivante :

$$CV (\%) = \frac{\sigma}{\bar{X}} \dots\dots(V.4)$$

On peut apprécier la valeur du coefficient de variation **CV**, d'après l'indication figurant au tableau suivant [36]:

Tableau V.1 : Valeur du coefficient de variation. [36]

Béton fabriqué	Valeur du coefficient de variation		
	Excellentes	Bonnes	Mauvaises
Au laboratoire	$\leq 8 \%$	$\leq 12 \%$	$> 15 \%$
En centrale	$\leq 10 \%$	$\leq 15 \%$	$> 20 \%$
Sur chantier	$\leq 15 \%$	$\leq 20 \%$	$> 25 \%$

a. Pour un béton à granularité discontinue :

Tableau V.2 : Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité discontinue à 14 jours.

Classes du béton	\bar{X} (MPa)	σ	CV (%)	Type de dispersion
C _{d20}	12,209	1,1799	9,66	Bonne
C _{d25}	16,027	1,2302	7,67	Excellente
C _{d30}	21,718	1,2012	5,52	Excellente
C _{d35}	28,045	3,317	11,82	Bonne
C _{d40}	28,251	1,3346	4,72	Excellente

Tableau V.3 : Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité discontinue à 28 jours.

Classes du béton	\bar{X} (MPa)	σ	CV (%)	Type de dispersion
C _{d20}	14,234	0,051	0,36	Excellente
C _{d25}	20,100	0,513	2,55	Excellente
C _{d30}	26,189	0,649	2,47	Excellente
C _{d35}	32,666	0,955	2,92	Excellente
C _{d40}	35,655	0,922	2,58	Excellente

b. Pour un béton à granularité continue :

Tableau V.4 : Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité continue à 14 jours.

Classes du béton	\bar{X} (MPa)	σ	CV (%)	Type de dispersion
C _{c20}	15,286	1,006	6,58	Excellente
C _{c25}	21,184	0,813	3,83	Excellente
C _{c30}	24,224	0,233	0,96	Excellente
C _{c35}	28,447	1,745	6,16	Excellente
C _{c40}	27,143	0,405	1,49	Excellente

Tableau V.5 : Dispersion des valeurs des différentes classes du béton de granularité continue à 28 jours.

Classes du béton	\bar{X} (MPa)	σ	CV (%)	Type de dispersion
C _{c20}	18,815	0,701	3,70	Excellente
C _{c25}	24,945	0,745	2,90	Excellente
C _{c30}	27,797	0,773	2,70	Excellente
C _{c35}	33,347	1,275	3,80	Excellente
C _{c40}	37,304	0,705	1,88	Excellente

Observations :

Pour un béton fabriqué au laboratoire $CV \leq 8 \%$.

La majorité des résultats obtenus sont excellents, avec quelques résultats bons.

Commentaires :

Les résultats excellents donnent une indication sur la satisfaction des conditions de confection des éprouvettes au laboratoire.

V.3 Résultats expérimentaux obtenus à l'état frais :

a. Propriétés physiques:

Tableau V.6 : Propriétés physiques des bétons étudiés.

Classes du béton	Masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m ³)	Affaissement (cm)	E/C		Teneur en air (%)
			Total	Efficace	
C _{d20*}	2416	5,5	0,78	0,81	1,80
C _{d25*}	2409	5,5	0,68	0,69	1,95
C _{d30*}	2412	6,0	0,60	0,60	2,00
C _{d35*}	2422	6,0	0,53	0,53	2,00
C _{d40*}	2415	5,5	0,48	0,48	1,90
C _{c20**}	2415	6,0	0,78	0,80	1,80
C _{c25**}	2417	5,0	0,68	0,71	1,90
C _{c30**}	2417	6,0	0,60	0,60	1,90
C _{c35**}	2408	6,0	0,53	0,58	1,85
C _{c40**}	2405	6,0	0,48	0,52	1,80

d_{20*} : (d) granularité discontinue et (20) la classe de résistance de béton.

c_{20**}: (c) granularité continue et (20) la classe de résistance de béton.

V.3.1 La granularité discontinue :

a. Teneur en air :

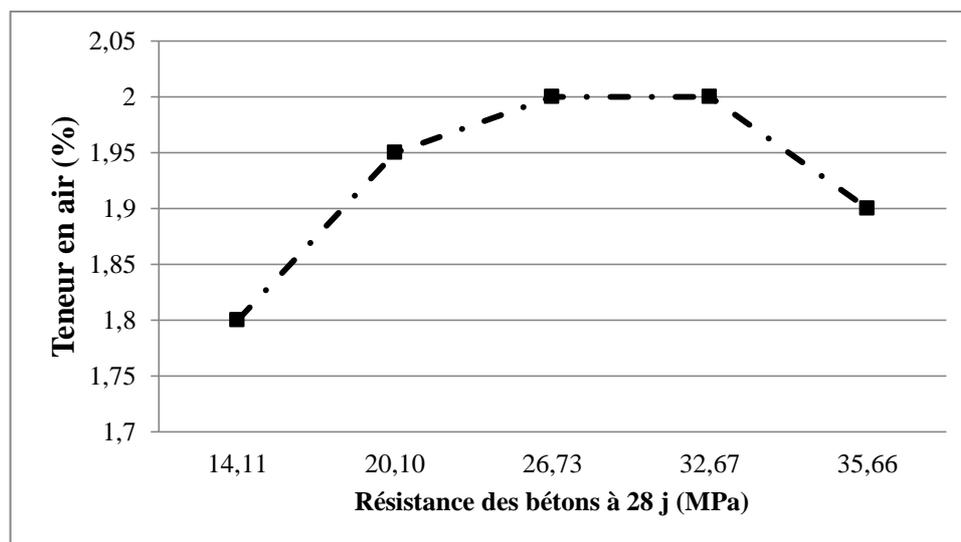


Figure V.1: Variation de la teneur en air pour les différents types du béton (Granularité discontinue).

Observations :

On observe que la relation liant la teneur en air avec la résistance du béton est du type non linéaire, une augmentation de la teneur en air est constatée pour les résistances : 14,11, 20,10 et 26,73 MPa, suivie d'un palier stable, et elle devienne décroissante à partir du : 32,67 MPa.

Commentaires :

- Pour les bétons de résistances 14,11 MPa à 32,67 MPa l'augmentation de la teneur en air est peut justifier par la diminution de la fraction granulaire substitué du sable rentrant dans la formule du béton, ce dernier joue le rôle de remplissage des vides.
- Pour les bétons de résistances élevées, supérieures à 32,67 MPa, on explique la diminution de la porosité par le remplissage efficace des vides avec les fines (pourcentage élevé du ciment), et la limitation de E/C nécessaire pour avoir un béton de résistance acceptable.

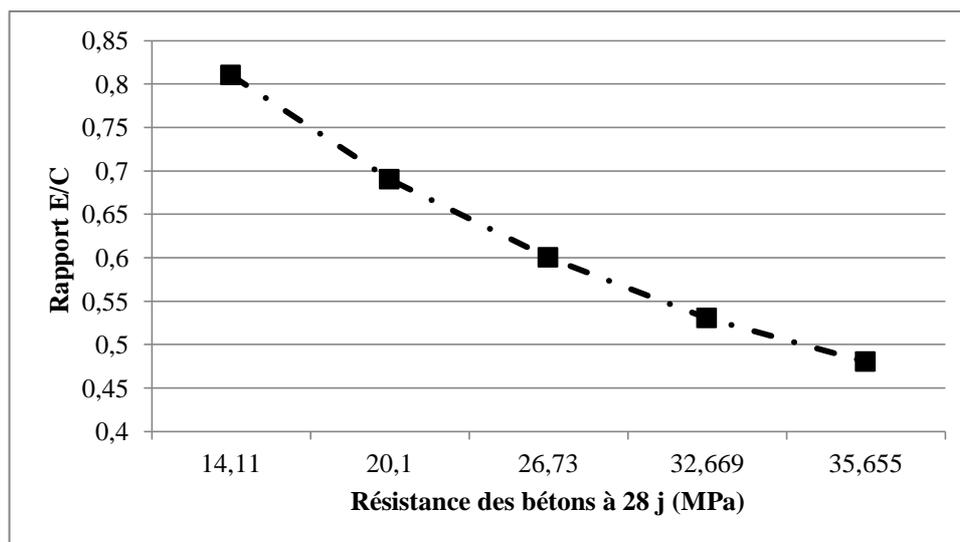
b. Rapport E/C :

Figure V.2 : Variation du rapport E/C pour les différents types du béton (Granularité discontinue).

Observations :

La relation mathématique entre les deux grandeurs : E/C et la résistance du béton est de type non linéaire. On remarque que le rapport E/C diminue avec l'augmentation de la classe de résistance du béton est l'inverse.

Commentaires :

- L'augmentation du rapport E/C conduit à une diminution de la compacité et une porosité élevée le cas (18,82 ; 24,54 et 27,31) ce qui influe négativement sur la résistance du béton.

V.3.2 La granularité continue :

a. Teneur en air (%) :

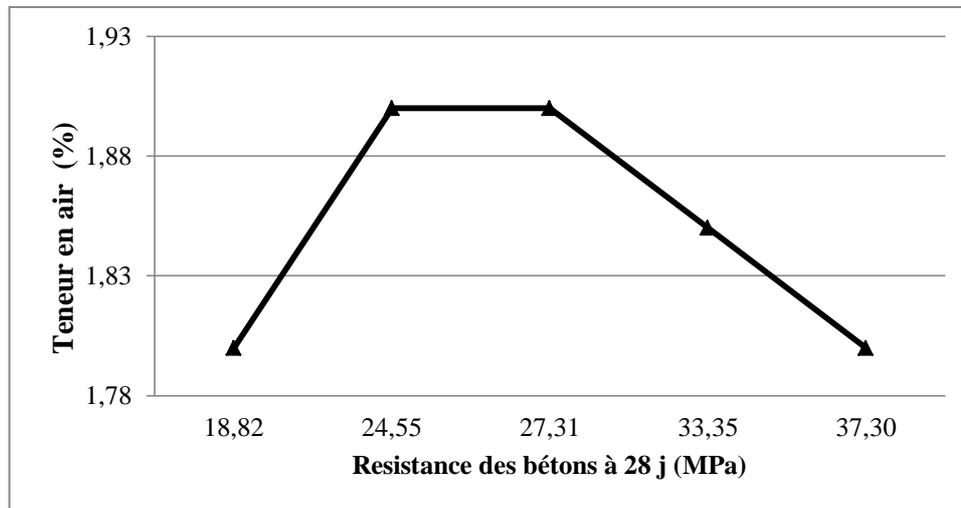


Figure V.3 : Variation de la teneur en air pour les différents types de béton (Granularité continue).

Observations :

On observe que la relation entre la teneur en air et la résistance du béton est de type non linéaire. Une augmentation de la teneur en air est constatée pour les résistances : 18,82 et 24,55 MPa suivi par un palier stable, et elle devient décroissante à partir de : 27,31 MPa.

Commentaires :

- Pour les bétons de faible résistance (18,82 à 24,55 MPa), on explique la faible teneur en air par le dosage élevé en sable et l'influence de la granularité continue qu'elle présente un remplissage efficace des vides entre les agrégats de différents grosseurs (petites, moyennes et gros gravier) .
- Pour les bétons de moyenne résistance (24,55 à 27,31 MPa), l'explication de l'augmentation de la teneur en air est due à l'augmentation du dosage en gravier par rapport au dosage en sable qui provoque la création des pores dans la structure du béton.
- Pour les bétons de résistance élevée supérieur à 27,31 MPa, on explique la diminution de la teneur en air par le remplissage efficace des vides par les fines (ciment, sable) et la diminution du dosage des gros agrégats.

b. Rapport E/C :

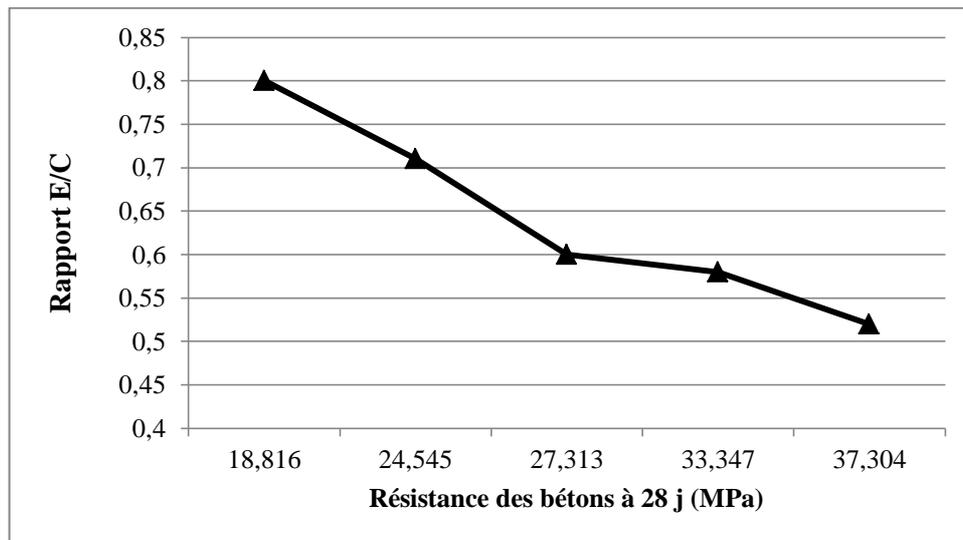


Figure V.4 : Variation des rapports E/C en fonction de la variation des résistances des bétons (granularité continue).

Observation :

La même remarque que les bétons à granularité discontinue.

V.4 Comparaison entre les différents types du béton :

a. Teneur en air :

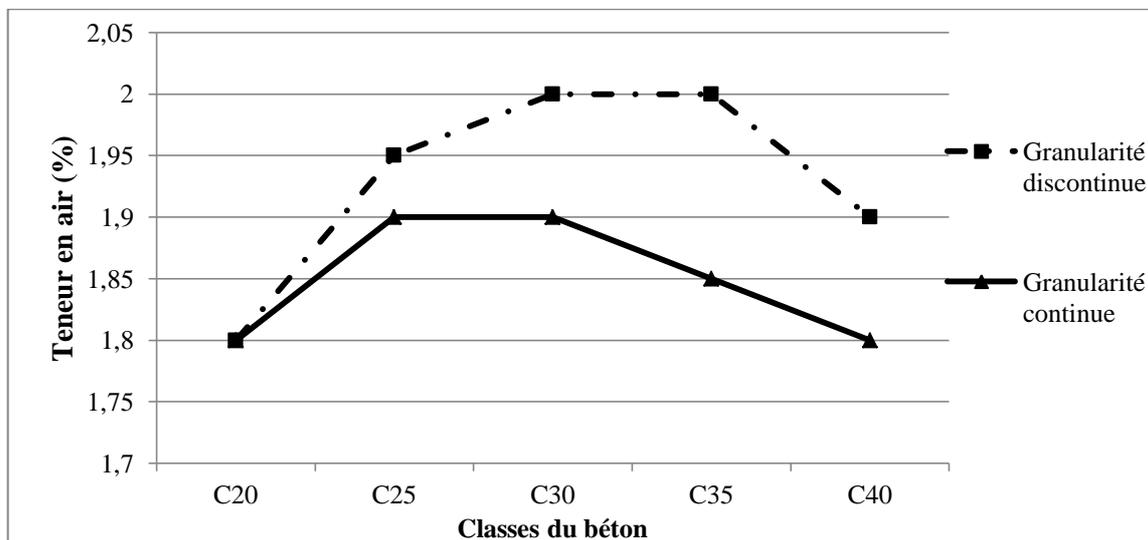


Figure V.5 : Comparaison entre la teneur en air des bétons à granularité continue et discontinue.

Observations :

Il se manifeste que les bétons à granularité discontinue renferment plus d'air par rapport aux bétons à granularité continué.

Commentaires :

- L'emploi de la fraction granulaire (3/8) dans la formulation des bétons à granularité continue a un effet remarquable vis-à-vis à la teneur en air par rapport aux bétons à granularité discontinue.

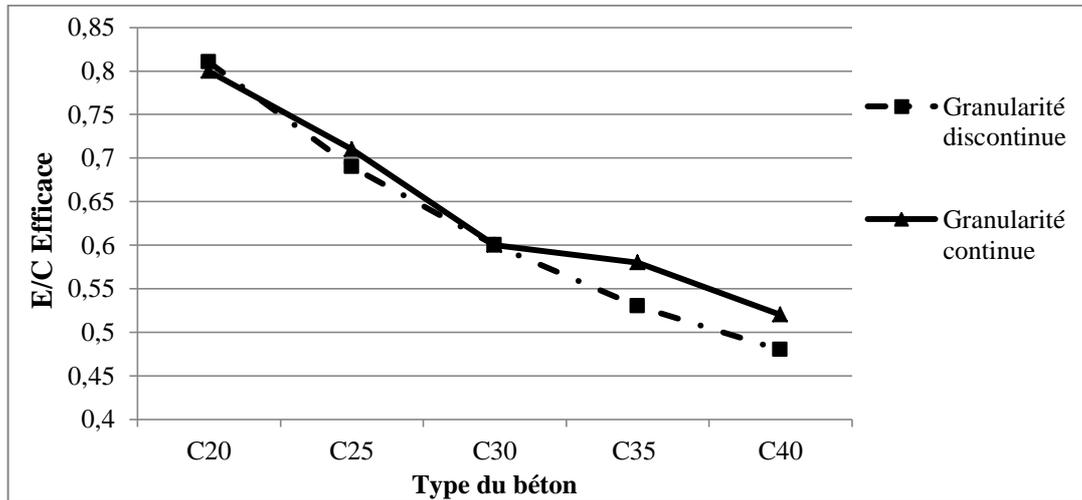
b. Rapport E/C :

Figure V.6 : Comparaison entre le rapport E/C pour les bétons à granularité continue et discontinue.

Observations :

Les rapports E/C pour les deux types du béton sont très proches l'un par rapport à l'autre.

Les bétons à granularité continue nécessitent une quantité supplémentaire d'eau de gâchage.

Commentaires :

- On justifier cette consommation d'eau supplémentaire, par le fait que les grandes nombres de gravier nécessitent un besoin d'eau élevée pour être entourés et mouillés complètement.
- Donc, la granularité continue semble avoir un effet sur E/C pour les bétons à haute résistance.

V.5 A l'état durci :

a. Corrélation linéaire et droite de régression:

Dans le domaine des sciences appliquées, il est fréquent d'observer des phénomènes où il y a lieu de soupçonner l'existence d'une liaison entre deux variables. Cette liaison est appelée corrélation. On dit qu'il y a corrélation entre deux variables observées lorsque les deux variables se produisent dans le même sens (corrélation positive) ; ou sont de sens contraires (corrélation négative).

L'existence d'une corrélation entre deux variables peut être décelée graphiquement.

Il s'agit de reporter les couples d'observations (x_i, y_i) sur un graphique en prenant pour abscisse la variable x , et pour ordonnée la variable y . Chaque point de graphique représente simultanément la valeur x_i , et la valeur y_i . Le graphique résultant constitue un nuage de points appelé : diagramme de dispersion. [17]

b. Le coefficient de corrélation :

On peut calculer l'indice qui mesure l'intensité de la liaison linéaire entre deux variables selon le coefficient de corrélation R , qui est un nombre sans dimension.

Où n : est le nombre de couples d'observation (x_i, y_i) , En raison de la symétrie de sa définition, R mesure aussi bien l'intensité de la liaison entre y et x qu'entre x et y .

Le coefficient de corrélation est indépendant des unités de mesure de x et de y .

La valeur de R peut varier entre -1 , $+1$ [corrélation négative et parfaite, corrélation positive et parfaite]. Plus les points sont étroitement alignés selon une droite, plus la valeur du coefficient de corrélation sera élevée et s'approchant de $+1$ ou -1 selon le cas. [17]

c. La droite de régression

On va essayer d'établir l'équation de la liaison linéaire existant entre les deux variables x et y . La droite qui s'ajuste le mieux aux observations s'appelle la droite de régression cette droite est un outil de prévision on pourra estimer ou prévoir à l'aide de cette équation les valeurs d'une variable à partir des valeurs prises par l'autre variable.

On choisit y comme variable dépendante ou expliquée et x comme variable indépendante ou explicative. [17]

Soit un échantillon de n couples d'observations (x_i, y_i) , et soit l'équation de la droite :

$$y_i = b_0 + b_1 * x_i \dots\dots(V.5)$$

b_0 ordonnée à l'origine, b_1 pente de la droite et y_i représente la valeur estimée de la variable dépendante pour une valeur particulière x_i de la variable explicative (indépendante). [17]

Tableau V.7: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 7 jours.

Classes du béton	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200 mm)			Rc MOY (MPa)
		T (μ s)	V (m/s)	Ru (MPa)	
C _{d20}	2378	54,6	3665	12,5	9,958
C _{d25}	2380	51,4	3887	16,9	14,893
C _{d30}	2384	51,8	3857	15,9	18,672
C _{d35}	2390	48,8	4094	21,4	23,423
C _{d40}	2385	49,5	4040	20,4	20,299
C _{c20}	2365	55,4	3610	12,1	12,245
C _{c25}	2390	51,9	3854	16,0	17,983
C _{c30}	2385	50,2	3984	19,2	20,970
C _{c35}	2387	49,8	4016	20,8	22,70
C _{c40}	2384	49,8	4016	20,8	26,230

7 jours

Tableau V.8: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 14 jours.

Classes du béton	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200 mm)			Scléromètre		Rus combinée (MPa)	Rc MOY (MPa)
		T (μ s)	V (m/s)	Ru (MPa)	Is	Rs (MPa)		
C _{d20}	2395	53,5	3738	14,0	24	11,4	10,0	12,209
C _{d25}	2394	51,0	3922	18,1	29	17,0	17,2	16,027
C _{d30}	2393	49,9	4008	20,6	31	20,0	19,8	21,718
C _{d35}	2395	47,4	4219	27,1	33	23,0	27,7	29,543
C _{d40}	2383	47,4	4219	27,1	34	24,9	28,0	28,251
C _{c20}	2378	52,4	3817	15,4	25	12,0	13,4	15,291
C _{c25}	2398	49,7	4024	20,6	30	19,0	21,0	21,184
C _{c30}	2408	48,9	4090	22,3	32	22,0	24,4	24,169
C _{c35}	2387	48,9	4090	22,3	34	24,9	24,7	28,448
C _{c40}	2385	48,9	4090	22,3	35	26,0	24,7	27,143

14 jours

Tableau V.9: Propriétés physiques et mécaniques des bétons étudiés à 28 jours.

Classes du béton	ρ durci (kg/m ³)	Ultrason (L=200 mm)				Scléromètre		Rus combinée (MPa)	Rc MOY (MPa)
		T (μ s)	V (m/s)	E _d (MPa)	Ru (MPa)	Is	Rs (MPa)		
C _{d20}	2380	52,5	3808	25639	15,300	28	16,0	13,4	14,110
C _{d25}	2394	50,1	3992	28341	19,700	31	20,0	19,8	20,100
C _{d30}	2396	47,8	4177	31056	25,341	34	25,0	26,9	26,730
C _{d35}	2416	45,5	4389	44063	44,063	38	31,9	34,2	32,669
C _{d40}	2403	45,3	4409	44360	44,360	39	33,9	36,5	35,655
C _{c20}	2386	50,6	3951	27838	17,850	30	19,0	18,1	18,816
C _{c25}	2394	49,5	4034	28850	20,633	33	23,3	22,1	24,545
C _{c30}	2395	47,6	4200	31371	25,500	35	26,0	28,2	27,313
C _{c35}	2393	45,3	4408	44153	44,153	38	31,7	34,5	33,347
C _{c40}	2389	44,9	4448	44776	44,776	39	34,0	38,3	37,304

28 jours

Commentaires :

Les résultats obtenus par l'essai d'écrasement montrent que les résultats des bétons à base de granularité continue (Cc) sont supérieurs à ceux des bétons à granularité discontinue (Cd), la réponse est peut justifier par la compacité élevée du premier type du béton (Cc) est par rapport du deuxième type du béton (Cd).

V.5.1 Propriétés physiques :**a. Absorption d'eau:**

Les résultats d'absorption d'eau pour les différents types des bétons sont regroupés dans le tableau (V.10) :

Tableau V.10 : Variation du taux d'absorption pour les différentes classes du béton à base de granularités discontinue.

Type de béton	Taux d'absorption A (%)
C _{d20}	7,46
C _{d25}	6,80
C _{d30}	6,70
C _{d35}	6,30
C _{d40}	6,25

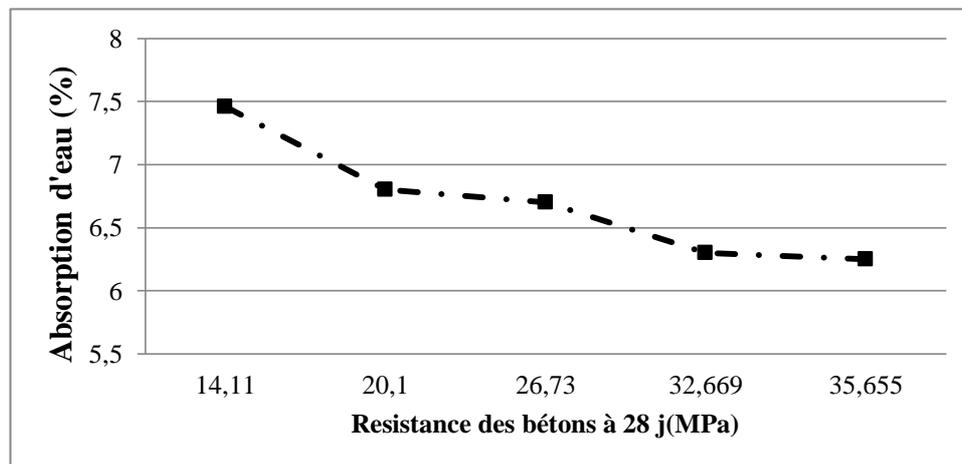


Figure V.7: Variation du taux d'absorption des différents types du béton à 28 jours (granularité discontinue).

Observations :

Les bétons de faible résistance présentent une grande capacité d'absorption par rapport aux autres bétons de résistance plus haute.

Commentaires :

- La grande capacité d'absorption d'eau du béton de résistance 14,11 MPa peut être justifiée par le dosage élevée en sable qui absorbe beaucoup d'eau et qui informe aussi sur la porosité de ce béton, par contre les autres bétons contiennent un faible dosage en sable et un dosage proportionnellement élevé en ciment.

Tableau V.11 : *Variation du taux d'absorption pour les différentes classes du béton à granularité continue.*

Type de béton	Taux d'absorption A (%)
C _{c20}	7,23
C _{c25}	6,65
C _{c30}	6,12
C _{c35}	5,80
C _{c40}	4,25

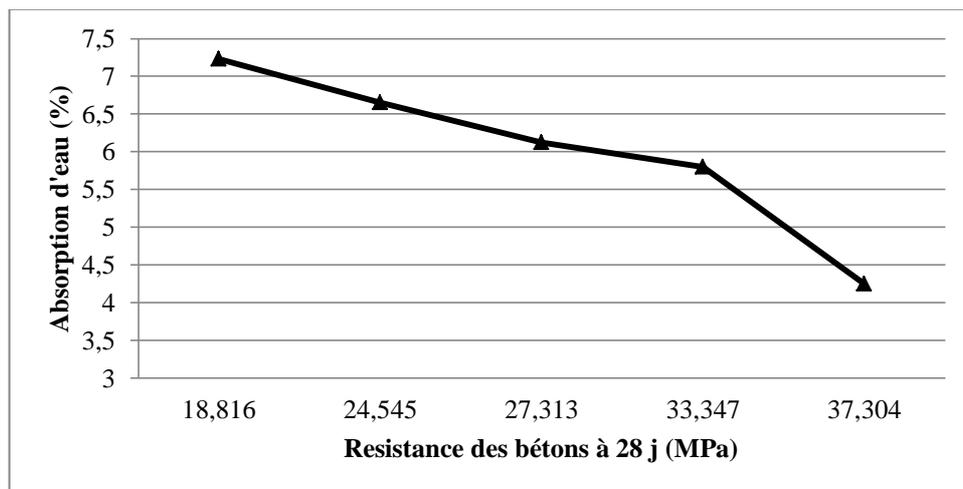


Figure V.8: *Variation du taux d'absorption des différents types du béton à 28 jours (granularité continue).*

Observations :

L'absorption d'eau est variée inversement avec l'augmentation de la classe de résistance des bétons étudiés.

Commentaires :

- La même remarque pour les bétons à granularité continue, la différence est le taux d'absorption qui est un peu faible par rapport aux bétons à granularité discontinue.

V.5.1.1 Comparaison entre les différents types du béton :

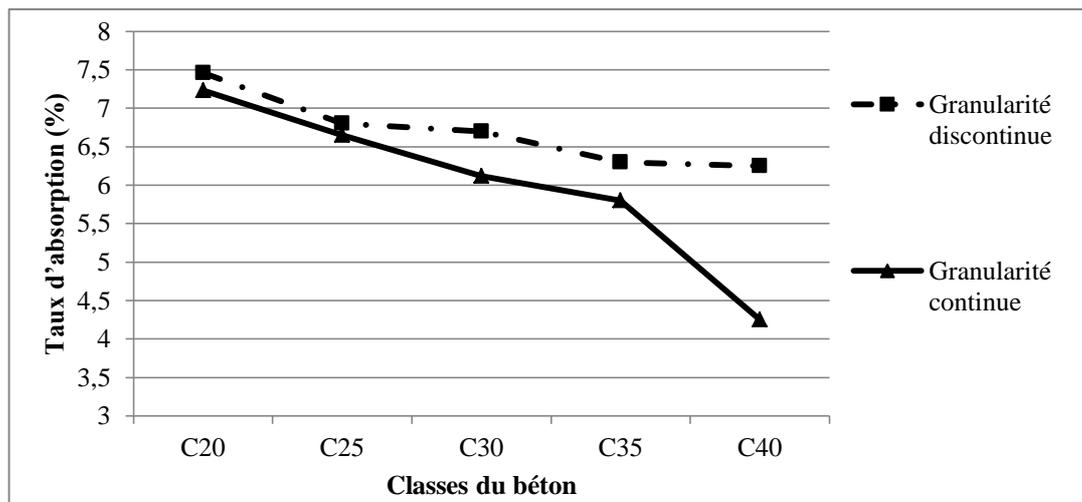


Figure V.9: Comparaison du taux d'absorption d'eau entre les différents types du béton à 28 jours.

Observations :

Les résultats sont comparables avec quelques variations proportionnelles pour les bétons moins de 30 MPa.

Pour les classes (C_{d40} et C_{c40}) la variation du taux d'absorption est remarquable avec un taux de 32%.

Commentaires :

- Cette différence du taux d'absorption d'eau est peut expliquée par l'utilisation de la granularité continue, elle présente un remplissage meilleur des vides par rapport aux bétons à granularité discontinue ce qui diminuer la capacité d'absorption d'eau.

V.6 Corrélations pour les propriétés mécaniques :

V.6.1 Corrélation entre la résistance à la compression (R_c) et la vitesse du son (V):

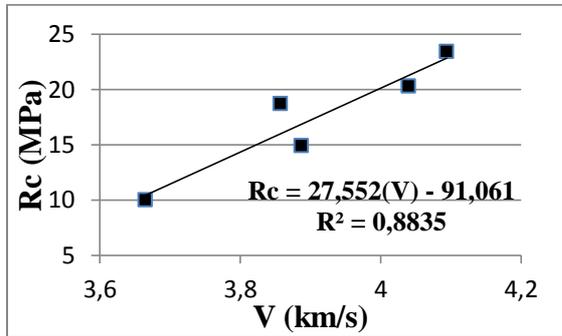


Figure V.10 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 7 jours (granularité discontinue).

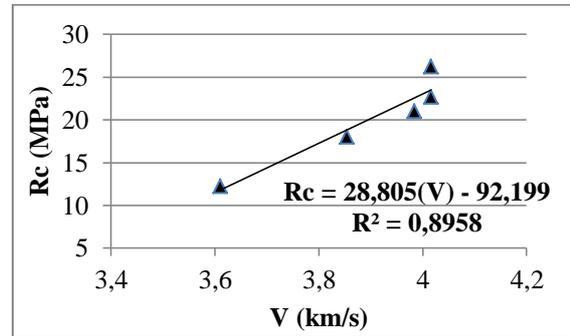


Figure V.13 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 7 jours (granularité continue).

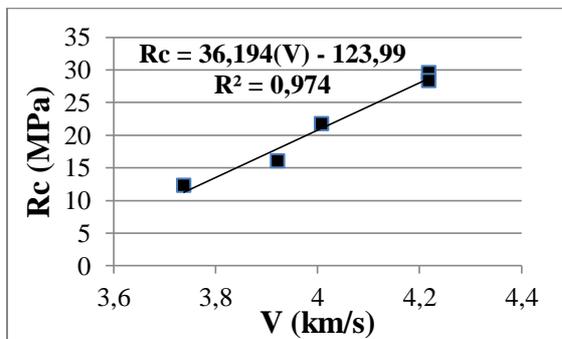


Figure V.11 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 14 jours (granularité discontinue).

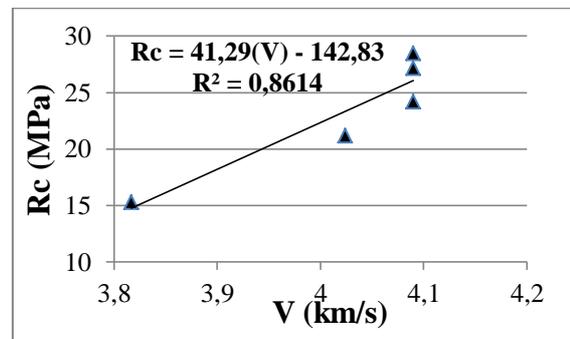


Figure V.14 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 14 jours (granularité continue).

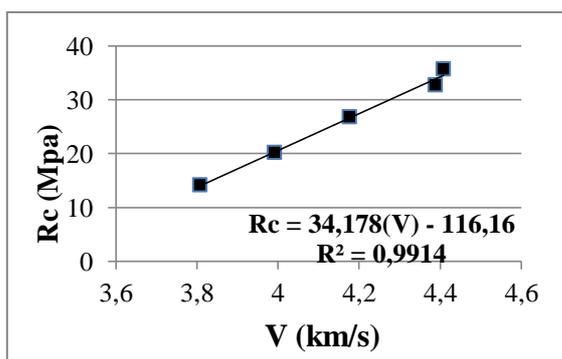


Figure V.12 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 28 jours (granularité discontinue).

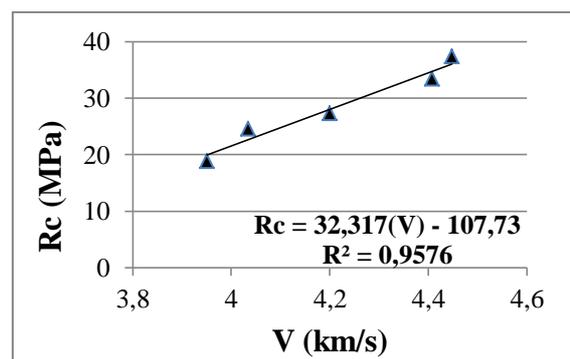


Figure V.15 : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son à 28 jours (granularité continue).

Observations :

Pour les figures (V.10), (V.13) et (V.14) la droite de régression ne passe pas par la majorité des points.

Pour les autres figures (V.11), (V.12) et (V.15) la majorité des points se coïncident avec la droite de régression.

Les coefficients de corrélations à 7 jours est de $R^2 = 0,88$, par contre les coefficients de corrélations tirés des bétons plus âgés (14 et 28 jours) sont plus proches à l'unité.

La majorité des corrélations obtenues sont linéaires et la variation de R_c en fonction de (V) est corrélative.

Commentaires :

On peut justifier l'écart des coefficients de corrélations à 7 jours par l'étalement entre la résistance d'ultrason à jeune âge et les résultats des essais d'écrasement, par contre, l'écart des coefficients de corrélations à 14 jours et à 28 jours la résistance d'ultrason et les résultats des essais d'écrasement sont plus proches.

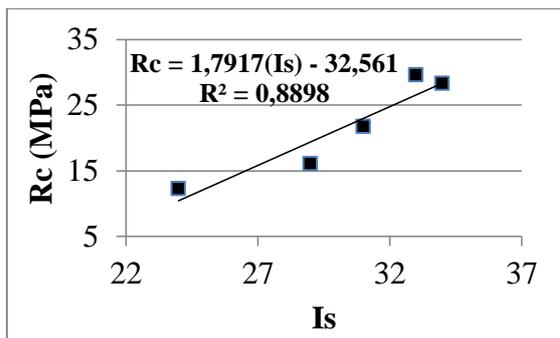
V.6.2 Corrélation entre l'indice sclérométrique (Is) et la résistance à la compression (Rc) :

Figure V.16 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique Is à 14 jours (granularité discontinue).

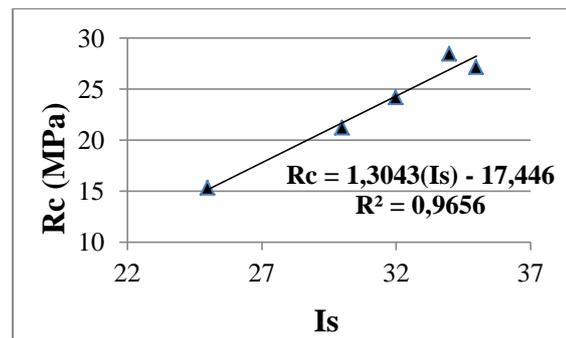


Figure V.18 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique Is à 14 jours (granularité continue).

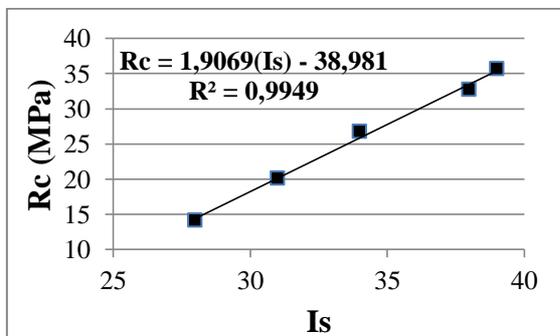


Figure V.17 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique Is à 28 jours (granularité discontinue).

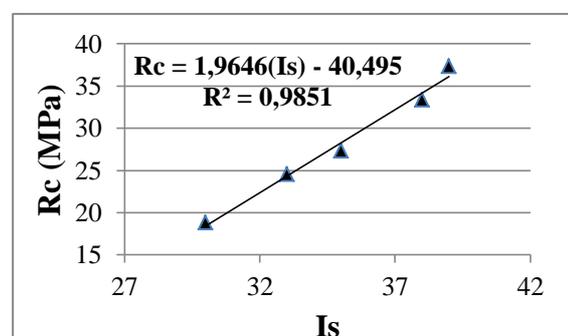


Figure V.19 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique Is à 28 jours (granularité continue).

Observations :

La majorité des corrélations sont linéaires.

La droite de régression passe par la majorité des ponts, ce qui informe sur une bonne corrélation entre l'indice de rebondissement et la résistance par écrasement.

La droite de régression ne passe pas par la majorité des ponts dans la figure (V.16).

Commentaires :

Pour la figure (V.16) les résultats ne donnent pas une bonne corrélation, car, les bétons à granularité discontinue sont très hétérogènes par rapport à ceux à granularité continue, ce qui influe directement sur les résultats du scléromètre.

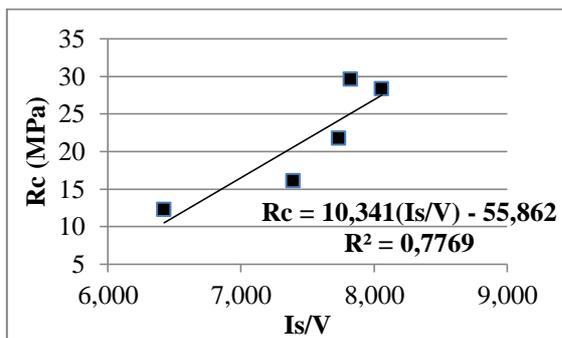
V.6.3 Corrélation entre (Is/V) et la résistance à la compression (Rc) :

Figure V.20 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (Is/V) à 14 jours (granularité discontinue).

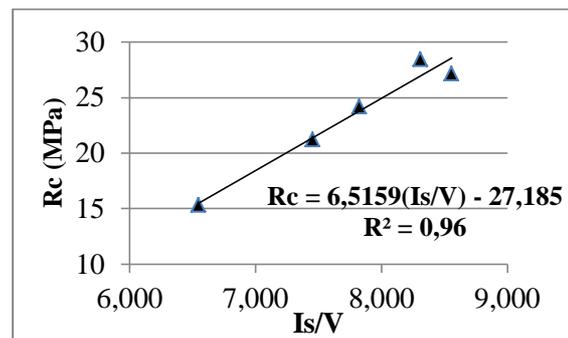


Figure V.22 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (Is/V) à 14 jours (granularité continue).

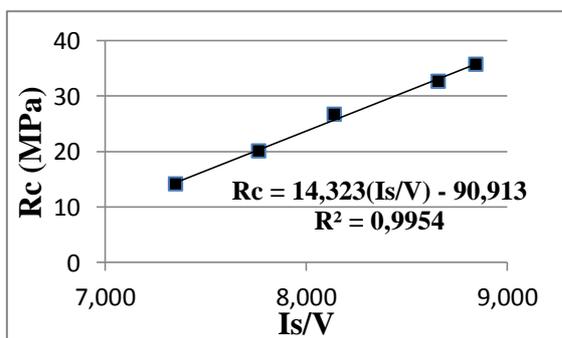


Figure V.21 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (Is/V) à 28 jours (granularité discontinue).

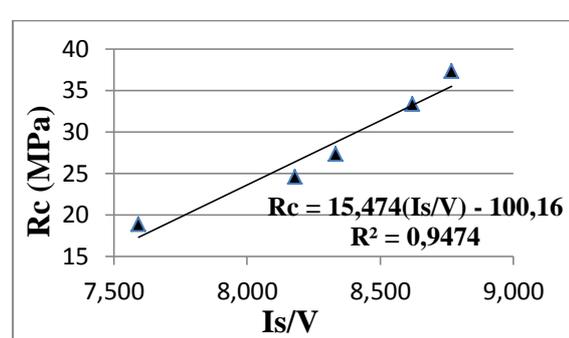


Figure V.23 : Corrélation entre la résistance à la compression en fonction du rapport (Is/V) à 28 jours (granularité continue).

Observations :

La majorité des corrélations sont linéaires.

La droite de régression passe par la majorité des points, ce qui informe sur une bonne corrélation entre (I_s/V) et la résistance par écrasement.

La droite de régression ne passe pas par la majorité des points dans la figure (V.20).

Commentaires :

Pour la figure (V.20) les résultats ne donnent pas une bonne corrélation, pour les bétons à granularité discontinue l'explication peut être provienne à la combinaison entre l'hétérogénéité de la structure des bétons de granularité discontinue et non murée du béton au jeune âge qui influe l'indice sclérométrique.

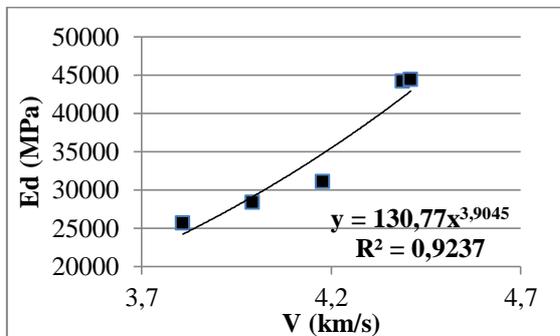
V.6.4 Corrélation entre le module d'élasticité dynamique (E_d) et la vitesse d'ultrason:

Figure V.24 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la vitesse d'ultrason à 28 jours (granularité discontinue).

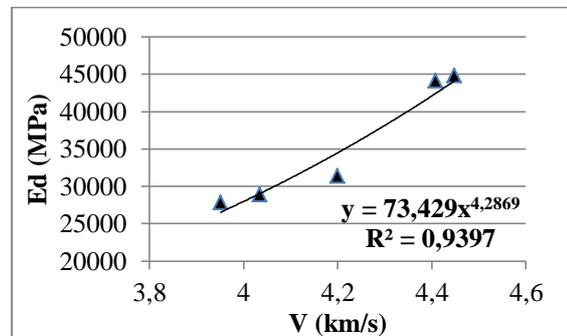


Figure V. 25 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la vitesse d'ultrason à 28 jours (granularité continue).

Observations :

Les deux corrélations sont de type non linéaire.

Les droites de régression ne passent pas par la majorité des points.

Les deux coefficients de corrélation sont proches à l'unité. $R^2 = (0,92, 0,94)$

Pour les bétons à base de granularité discontinue, le coefficient de corrélation est légèrement inférieur à celui du béton à granularité continue.

Commentaires :

La différence est justifiée par les performances mécaniques élevée que présente le béton de granularité continue par rapport au béton de granularité discontinue, grâce à sa compacité élevée.

V.6.5 Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et l'indice sclérométrique :

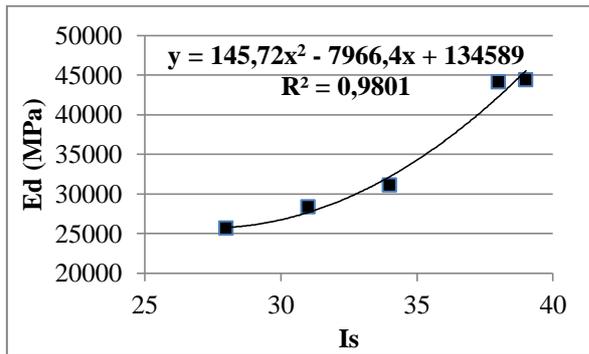


Figure V. 26 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité discontinue).

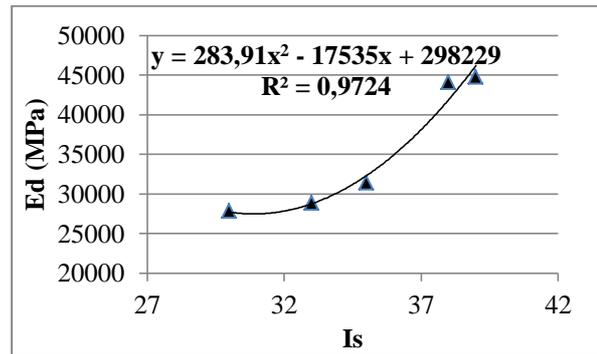


Figure V. 27 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité continue).

Observations :

Les deux corrélations sont du type non linéaire (polynomial).

Les deux coefficients de corrélation sont proches de l'unité.

V.6.6 Corrélation entre le module d'élasticité dynamique (E_d) et la résistance à la compression (R_c) :

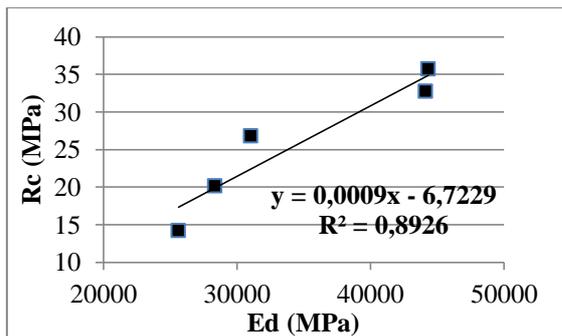


Figure V. 28 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression à 28 jours (granularité discontinue).

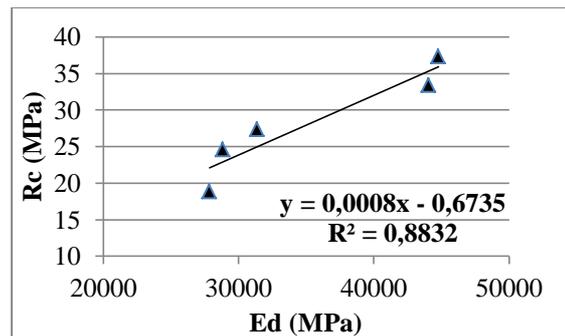


Figure V. 29 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression à 28 jours (granularité continue).

Les corrélations entre la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique des bétons étudiés sont comparables avec un coefficient de corrélation proche.

V.7 Corrélations pour les propriétés physiques :

V.7.1 Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et la vitesse du son:

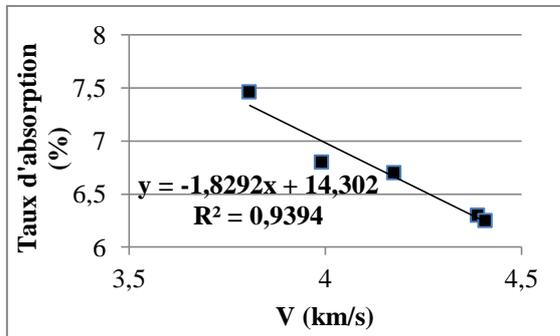


Figure V. 30 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et la vitesse du son à 28 jours (granularité discontinue).

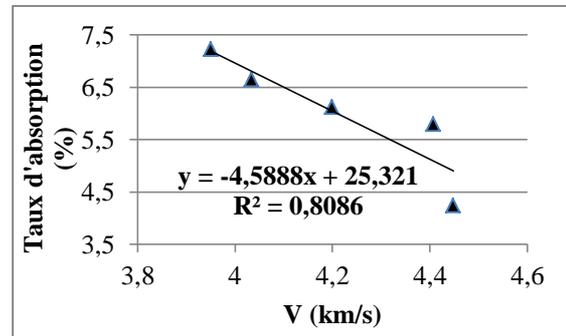


Figure V. 31 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et la vitesse du son à 28 jours (granularité continue).

Observations :

La corrélation entre le taux d'absorption et la vitesse d'ultrason est de type linéaire.

La droite de régression du béton à granularité discontinue passe par la majorité des points.

La droite de régression du béton à granularité continue ne passe pas par la majorité des points.

Le coefficient de corrélation pour les bétons à granularité discontinue proche de l'unité et supérieure à celui du béton à granularité continue.

La proportion entre le taux d'absorption et la vitesse du son est inverse.

Commentaires :

L'absorption est une propriété qui donne une indication sur la porosité accessible à l'eau, et généralement les matériaux poreux possèdent des vitesses de propagation des ondes ultrasons plus faibles à ceux moins poreux ce qui peut donner une justification claire sur la proportion inverse entre le taux d'absorption et la vitesse de propagation des ondes ultrasons.

V.7.2 Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et l'indice sclérométrique :

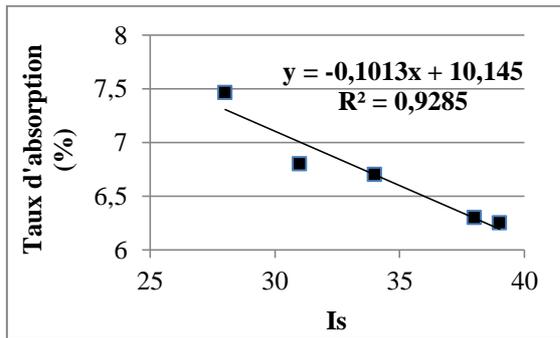


Figure V. 32 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité discontinue).

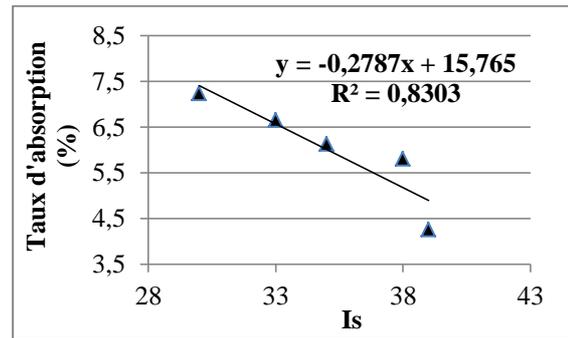


Figure V. 33 : Corrélation entre le taux d'absorption d'eau et l'indice sclérométrique à 28 jours (granularité continue).

Observations :

La corrélation entre le taux d'absorption et l'indice sclérométrique est de type linéaire.

La droite de régression des deux types de béton passe par la majorité des points.

Le coefficient de corrélation pour les bétons à granularité discontinue proche de l'unité et supérieure à celui du béton à granularité continue.

La proportion entre le taux d'absorption et la vitesse du son est une proportion inverse.

V.8 Comparaisons entre les différentes approches :

a. Résistance à la compression (R_c) en fonction de la vitesse d'ultrason suivant quelques approches :

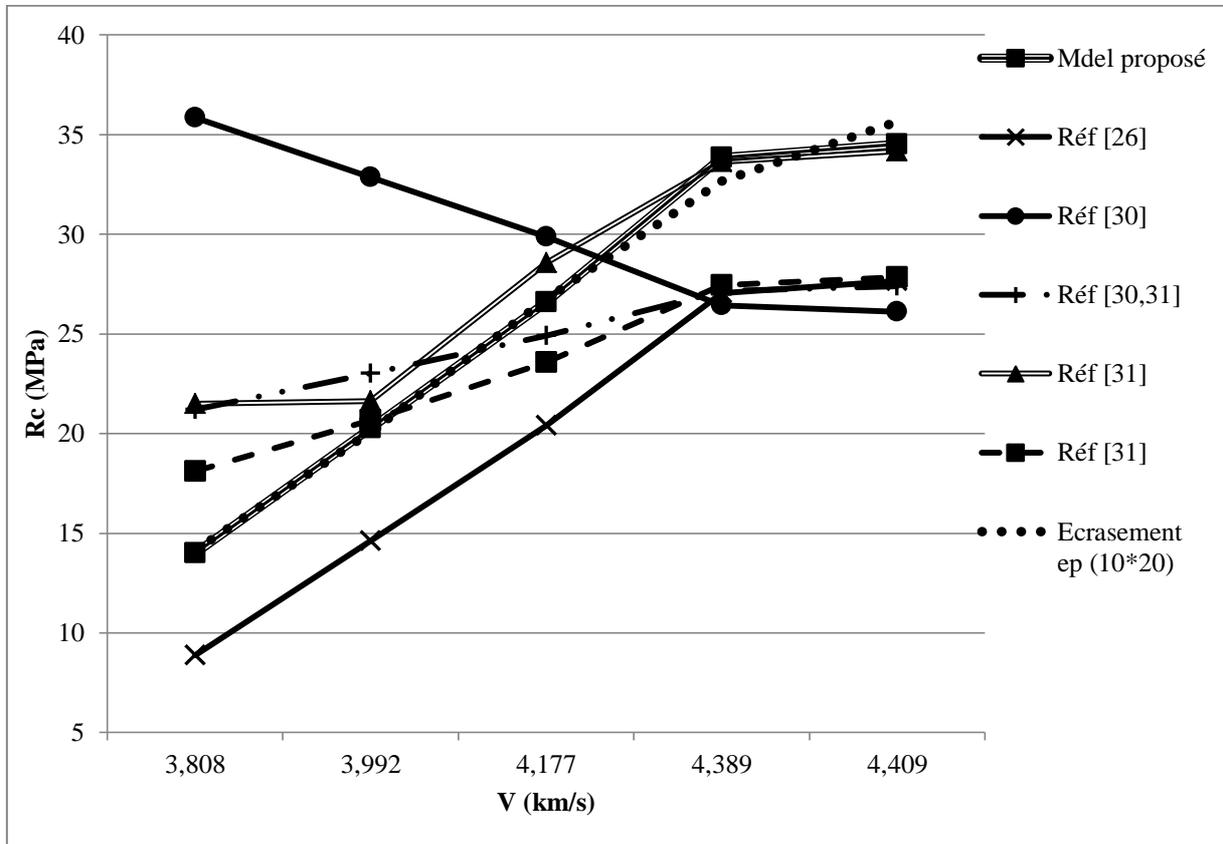


Figure V.34 : Estimation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la vitesse d'ultrason suivant les différentes approches.

Observations :

Les différentes méthodes nous donnent des écarts très importants : entre 22 % et 60 %.

Les résultats trouvés par la majorité des références sont situés au-dessus des résultats d'écrasement de faible résistance et au-dessous pour les bétons de résistance élevée sauf pour Réf [26] qui donne de résistance inférieures aux résultats d'écrasement.

Les résultats de la méthode du Réf [31] et le modèle proposé sont plus proches des résultats réels d'écrasement.

L'utilisation de ces méthodes spécifiques ne peut pas être validée totalement par rapport à nos conditions de fabrication et de formulation des bétons, ce qui donne intérêt à notre proposition.

b. Résistance à la compression (R_c) en fonction de l'indice sclérométrique suivant quelques approches :

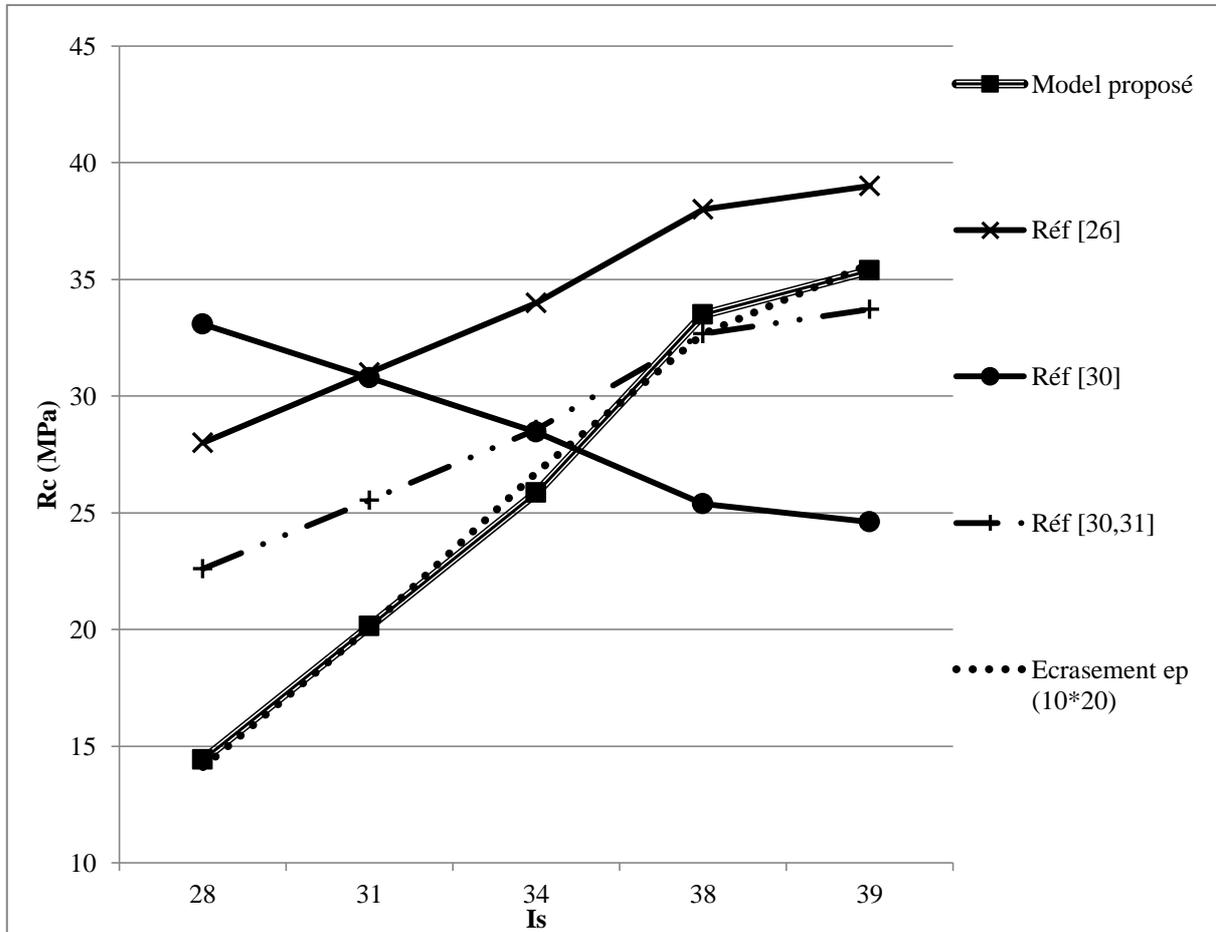


Figure V.35 : Estimation de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'indice sclérométrique suivant les différentes approches.

Observations :

Les différentes méthodes nous donnent des écarts importants entre : 30 % à 57 %.

Les résultats trouvés par les références sont situés au-dessus des résultats d'écrasement pour les classes de faible résistance.

Les résultats de la méthode Réf [30,31] et le modèle proposé pour la présente étude sont plus proches des résultats d'écrasement.

Généralement, l'utilisation de ces méthodes spécifiques ne peut pas être validée par rapport à nos conditions de fabrication et de formulation des bétons, ce qui donne intérêt à notre proposition.

c. Résistance à la compression (R_c) en fonction de la combinaison entre l'indice sclérométrique et la vitesse d'ultrason suivant quelques approches :

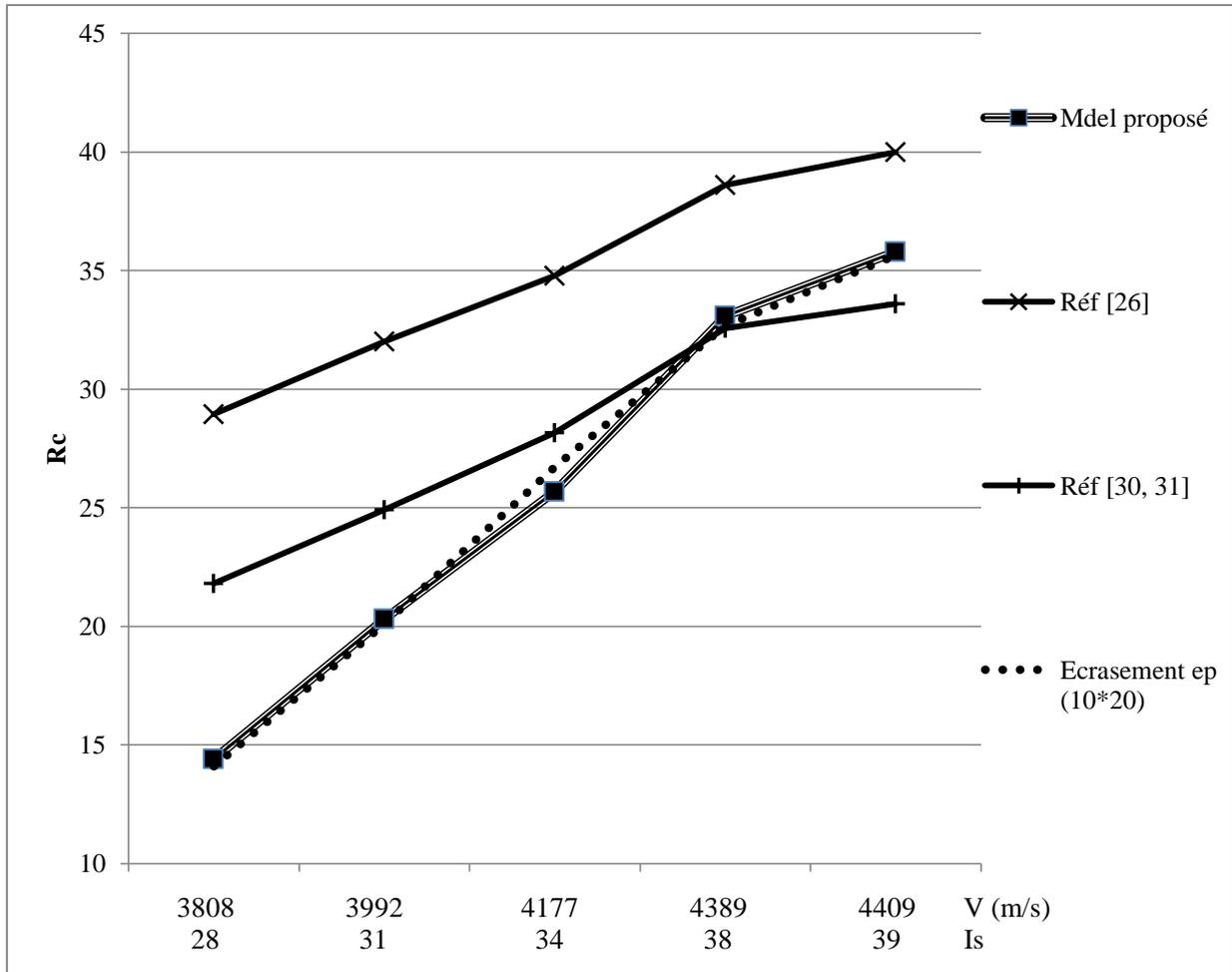


Figure V.36 : Approches proposées de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son et l'indice sclérométrique.

Observations :

Les différentes méthodes nous donnent des écarts importants : entre 11 % à 51 %.

Les résultats trouvés par les références sont situés au-dessus des résultats d'écrasement.

Les résultats de la méthode Réf [30,31] et le model proposé sont plus proches des résultats d'écrasement.

V.9. Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un béton :

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des formules de corrélation proposées, les résultats d'écrasement des bétons sont calibrés sur la base des éprouvettes 16/32.

Figure 37 : Formules de corrélation proposées pour l'estimation des propriétés physiques et mécaniques d'un béton.

Propriétés	Méthode utilisée	Granularité discontinue	Granularité continue
Taux d'absorption (%)	Ultrasound V (km/s)	$A (\%) = -1,8292 (V) + 13,630$ $R^2 = 0,9394$	$A (\%) = -4,3731 (V) + 24,131$ $R^2 = 0,8086$
	Scléromètre	$A (\%) = -0,0965 (Is) + 9,668$ $R^2 = 0,9285$	$A (\%) = -0,2656 (Is) + 15,024$ $R^2 = 0,8303$
Résistance à la compression Rc (MPa)	Ultrasound V (km/s)	$Rc = 32,572 (V) - 11,700$ $R^2 = 0,9914$	$Rc (MPa) = 30,798 (V) - 102,667$ $R^2 = 0,9576$
	Scléromètre	$Rc (MPa) = 1,8173 (Is) - 37,149$ $R^2 = 0,9949$	$Rc (MPa) = 1,8723 (Is) - 38,592$ $R^2 = 0,9851$
	Ultrasound & scléromètre V (km/s)	$Rc (MPa) = 13,650 (Is/V) - 86,640$ $R^2 = 0,9954$	$Rc (MPa) = 14,747 (Is/V) - 95,452$ $R^2 = 0,9474$
Module d'élasticité dynamique E_d (MPa)	Ultrasound V (km/s)	$E_d (MPa) = 124,624 (V)^{3,7210}$ $R^2 = 0,9237$	$E_d (MPa) = 69,978 (V)^{4,0854}$ $R^2 = 0,9397$
	Scléromètre	$E_d (MPa) = 138,871 (Is)^2 - 7591,979 (Is) + 12863,317$ $R^2 = 0,9801$	$E_d (MPa) = 270,566 (Is)^2 - 16710,855 (Is) + 284212,237$ $R^2 = 0,9724$
Rc en fonction de E_d (MPa)	E_d d'ultrasound	$Rc (MPa) = 0,0009 (E_d) - 6,7229$ $R^2 = 0,8926$	$Rc (MPa) = 0,0008 (E_d) - 0,6735$ $R^2 = 0,8832$

V.10 Conclusion:

Nous concluons que l'estimation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son et de l'indice sclérométrique représente une certaine fiabilité, mais elle a été influencée par plusieurs paramètres tels que l'âge de béton, le type (granularité discontinue, granularité continue), la qualité des constituants, les dimensions (grosseur des agrégats), les conditions de conservation (taux de cure) des échantillons utilisés, dosage en ciment, rapport E/C, serrage et la méthode d'exécution des essais d'auscultation.

Les courbes de corrélation données dans ce travail prouvent que l'évaluation fiable de la résistance in situ peut seulement être obtenue si la corrélation entre la résistance à la compression et la mesure d'essai non destructif, pour le même type de béton est correctement établie.

Les travaux réalisés dans le cadre de notre projet nous permettent d'établir des corrélations entre les propriétés mécaniques et physiques avec les résultats des essais non destructifs.

Chapitre VI :

Conclusion

et

perspectives

VI.1 Conclusion générale et perspectives :

Les objectifs visés dans cette étude sont -à notre avis- largement réalisés, nous considérons que le travail expérimental effectué dans le cadre de ce projet a touché la problématique posée au début, la démarche statistique suivie, et les résultats présentés des différentes corrélations entre les propriétés physiques et mécaniques montrent l'intérêt de la vision globale d'une caractérisation plus réaliste des bétons.

La comparaison des différentes approches utilisées pour l'estimation de la résistance du béton par les méthodes END nous a montré des écarts plus au moins importants, la chose qui rendre l'utilisation de ces approches pour l'auscultation d'un béton confectionné dans nos conditions locales n'est pas valable, vu la différence entre nos matériaux et notre composition avec les données de ces méthodes.

L'analyse de ce travail a prouvé que les paramètres qui influencent de manière significative la résistance du béton peuvent influencer les résultats d'essai non destructifs de la même manière.

Une évaluation aux moyens des essais non destructifs donnant une approche plus large de la qualité des bétons, et donc faisable.

Le travail présenté ici mérite d'être suivi par plusieurs d'autres travaux dans la même vision, afin de constituer une base de données servant au développement d'un projet scientifique d'évaluation non destructive des propriétés des bétons.

Nous proposons que la présente étude peut être complétée dans des travaux futurs par :

1. L'intégration de plus de paramètres dans l'étude de caractérisation des bétons.
2. Elargissement de l'étendue des classes de résistance des bétons étudié.
3. Enrichissement par une évaluation d'autres types de béton (BHP, BAP,...).
4. Numérisation et automatisation des modèles proposés pour une estimation plus rapide des propriétés des bétons.
5. Réalisation des études de caractérisation des bétons aux moyens non destructifs sur des ouvrages existants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] CIM Béton, TOME 1 fiche technique « Les constituants des bétons et des mortiers »
- [2] CIM Béton, TOME 2 fiches techniques « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre».
- [3] **MESSAOUDAN.B**, cours liants minéraux, Master I, 1^{er} semestre, Centre universitaire de Bordj Bou Arréridj, Année universitaire (2011/2012).
- [4] **JEAN FESTA – GEARGES DREUX, 2007**: « Nouveau guide des bétons », livre, Huitième édition 1998, Troisième tirage.
- [5] **Cyril Guérandel, 2009** « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation » Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine – Metz.
- [6] CIM Béton, centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciments et bétons » Conception et réalisation : Amprincipe Paris – Édition 2005.
- [7] **LOGZIT.N** cours Technologies du béton Master I, 1^{er} semestre, Centre universitaire de Bordj Bou Arréridj, Année universitaire (2011/2012).
- [8] **Mathieu Chekroun, 2008** « Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface » Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes.
- [9] **Gérard BERNIER, sino dato** « Formulation des bétons », Technique de l'ingénieur, Partie C 2 210.
- [10] **BELAGRAA.L** cours MDC, 3^{ème} année Licence, 2^{ème} Semestre, Centre Universitaire de Bordj Bou Arréridj, Année universitaire (2010/2011).
- [11] CIM Béton, centre d'information sur le ciment et ses applications « Bétons et mortiers : Préparation et mise en œuvre sur chantier » Conception et réalisation : Amprincipe Paris – Édition 2005.
- [12] « Eau de gâchage pour béton.», P 18-303, 1999.
- [13] B.T.S. TRAVAUX PUBLICS « LES BETONS PARTIE 04 » Lycée Pierre Caraminot 19300 EGLETONS 2002.
- [14] **Hü Cfaong, 1995**: «Rhéologie e des bétons fluides» Thèse de Doctorat, sino loco.
- [15] **MAAREF.H et MAHBOUS.R, 2007** « L'effet des modes de cure sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclés» mémoire de Master, Université Mohamed BOUDIAF M'SILA.
- [16] **MESSAOUDAN Brahim**, cours Durabilité des bétons, Master II, 1^{er} semestre, Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj, Année universitaire (2012/2013).
-

Références bibliographiques

- [17] **DEGHFEL MOUSSA, 2010** « Application de l'essai de dureté pour la caractérisation du béton », Mémoire de Magistère, Université de M'SILA.
- [18] **TOUKAL Abd Ennour, 2010** « influence du taux de chargement sur la caractérisation non destructif du béton par ultrason » Mémoire de Master, Université de M'hamed BOUGARA de BOUMERDACE.
- [19] **C.N.E.R.I.B, 2004** « Cycle de formation 2004 ».
- [20] **BENCHERAI Said, 2007** « Étude des techniques de renforcement des structures en béton arme contreventées par portiques auto stables » Mémoire de Master, Université Abd Errahmane MIRA de Béjaia.
- [21] **CHEKROUN Mathieu, 2008** « Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface » Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes.
- [22] **BREYSSE.D et ABRAHAM.O, 2005** « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons ». Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [23] **J.S. Popovics, sino dato** « Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves» Thèse de Doctorat, sino loco.
- [24] «Auscultation sonique : Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton» P18-418, 1989.
- [25] **CHERAIT Yacine et ZAHREDINNE Nafa, 2007** « éléments de matériaux de construction et essais » Direction de la publication universitaire de Guelma, p273-279.
- [26] **BOUDINA Ridha et LOURADI Abd Elouahab, 2012** « Proposition d'un modèle de corrélation entre les essais non destructifs et les essais d'écrasement d'un béton fabriqué dans les conditions locales. » Mémoire de Master, Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj.
- [27] **F.Gabrysak, sino dato** « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.
- [28] « Mesure de dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre», P18 417, 1989.
- [29] **BELARIBI.H, 2007** « Evaluation de la qualité du béton de fibre par les essais non destructifs (méthode combinée ultrasons et scléromètre) » Thèse de Magistère, Biskra.
- [30] **HANNACHL.S, GUETTECHE.M .N** « Application of the combined method for evaluating the compressive strength of concrete on site» Journal of Civil Engineering,Scientific Research, 2012.
-

Références bibliographiques

- [31] **T. H. Panzera et al, 2011** « Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials» Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Joãodel Rei - UFSJ, Praça Frei Orlando, 170 São João Del Rei – MG.
- [32] **AYADIB et HAMMACHE.Y, 2012** « Effet des fillers de calcaire sur le retrait d'un béton à base d'agrégats recyclés adjuvanté. » Mémoire de fin d'étude à Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj.
- [33] **HAMMOUCHE.Y et LAALAOULA, 2012** « Etude du comportement d'un béton en fibres Polypropylène aux moyens des essais non destructifs. » mémoire de fin d'étude à Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj.
- [34] **BRETTE.A** : Fascicule de cours réalisé par pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique, sino dato, sino loco.
- [35] **DAUPAIN.R, J.C. Saint-Arroman, 2009** « Granulats, sols, ciments et bétons », édition CASTEILLA-25, rue Monge-75005 PARIS, 4^{eme} édition actualisée, page : 31.
- [36] **MAKHLOUFLA**, cours Statistique, Master I, 1^{er} semestre, Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj, Année universitaire (2011/2012).
-